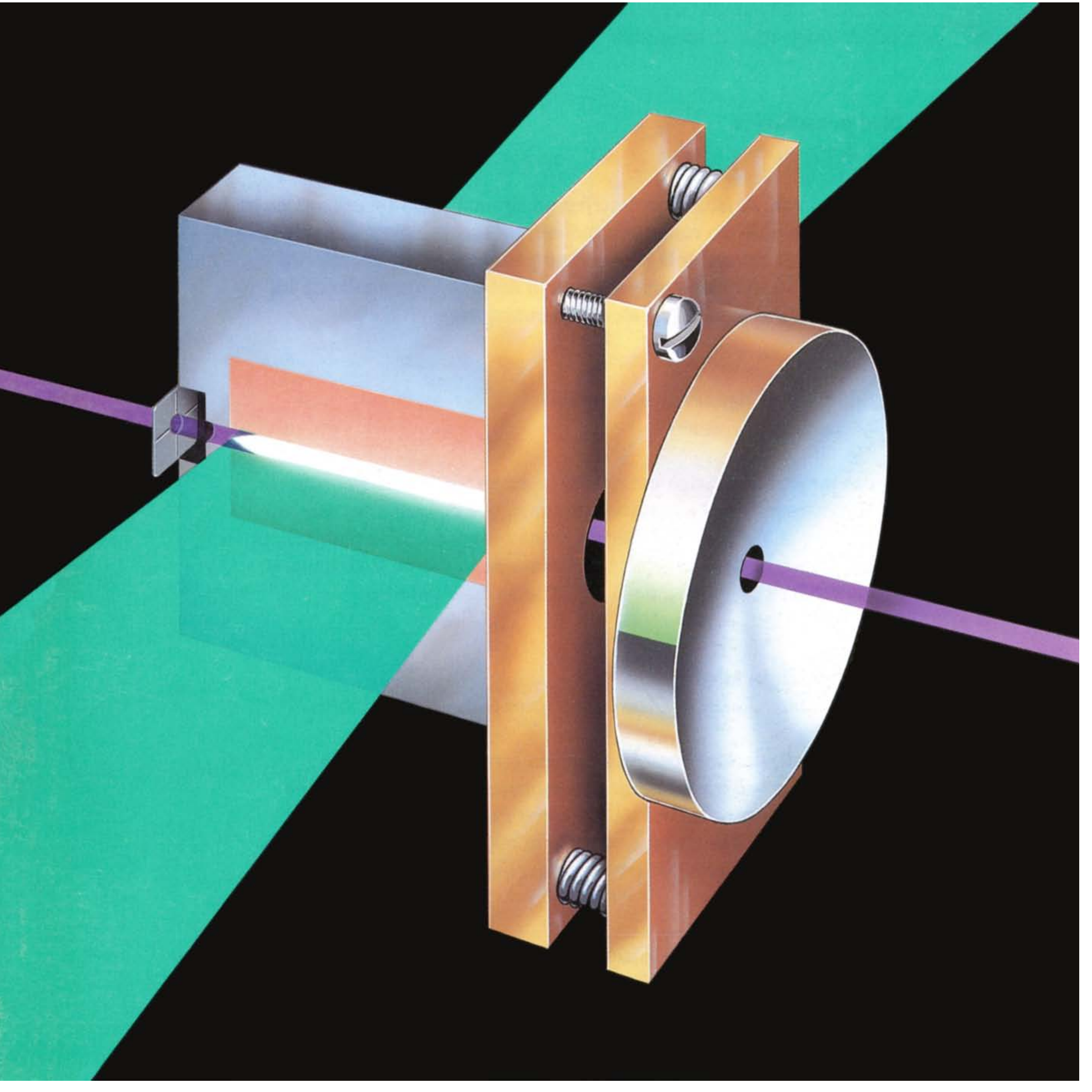
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**



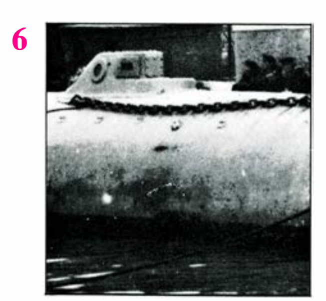
LASERES DE RAYOS X

Febrero 1989

500 Ptas.

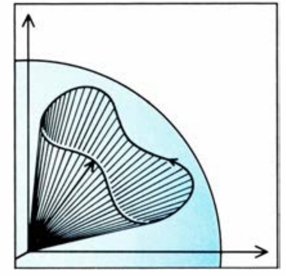
Copyright © 1989 Prensa Científica S.A.

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Febrero de 1989 Número 149

6 

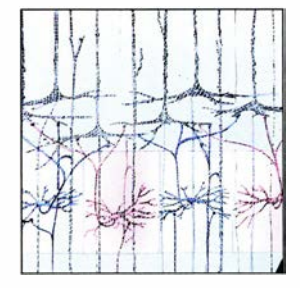
Isaac Peral
Laureano Carbonell Relat

La conciencia de los malos augurios que ensombrecían el futuro de España, en el último tercio del siglo pasado, le impulsaron a proyectar un torpedero submarino que contribuyera, desde la innovación técnica, a ahuyentarlos. La comisión asesora aprovechó los fracasos iniciales del primer prototipo para desaconsejar la construcción del segundo.

14 

La fase geométrica
Michael Berry

En ocasiones, una variable que describe un sistema físico (pensemos en un electrón que circunda un campo magnético) no recupera su valor primitivo cuando el sistema retorna a la posición de partida. La fase geométrica proporciona una explicación elegante y sutil del comportamiento de las partículas en ciertas situaciones mecánico-cuánticas.

22 

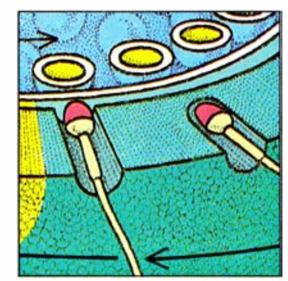
Plasticidad en el desarrollo cerebral
Chiye Aoki y Philip Siekevitz

El cerebro infantil no es algo definitivo. La experiencia y el ejercicio refinan y reestructuran el entramado de fibras que conectan las células nerviosas entre sí. Se acaba de descubrir una proteína que desempeña un papel decisivo en la configuración del sistema de la visión. Este hallazgo ayuda a entender la impronta de la experiencia en el cerebro.

40 

Terrenos configurados
William B. Krantz, Kevin J. Gleason y Nelson Caine

Los ciclos de congelación y deshielo pueden crear, con piedras, la vegetación o el propio suelo, formas geométricas muy llamativas. Los autores han desarrollado modelos donde muestran que la convección explicaría algunas de ellas. Con este artículo iniciamos una serie de ellos dedicados a la espectacularidad de ciertos fenómenos naturales.

48 

La fecundación en los mamíferos
Paul M. Wassarman

Multitud de espermatozoides se adhieren a un óvulo y perforan su cubierta exterior, pero sólo uno conseguirá fecundarlo. Una molécula singular, una glucoproteína, dirige muchos de los sucesos de la fecundación, incluidos los fenómenos mediante los cuales el óvulo fecundado resulta inmune a los acosos de los otros espermatozoides.

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

56 

Láseres de rayos X blandos
Dennis L. Matthews y Mordecai D. Rosen

La luz del láser no es solamente roja o verde. Puede ser también un haz de fotones de rayos X coherente y colimado, con longitudes de onda unas 100 veces más cortas que las del espectro visible. Un láser de rayos X blandos está capacitado para producir imágenes tridimensionales —hologramas— de estructuras biológicas vivas.

64 

Serpientes: circulación de la sangre y gravedad
Harvey B. Lillywhite

¿Qué es lo que evita que una serpiente sufra un desvanecimiento cuando se yergue para atacar o cuando trepa por el tronco de un árbol? ¿Por qué no desciende la sangre de la cabeza y se acumula en la cola? La explicación se halla en un sistema cardiovasculatorio, notablemente bien adaptado para el mantenimiento de la circulación.

72 

Ingenieros de canales del Perú preinca
Charles R. Ortloff

El reino de Chimor, dueño de la costa septentrional peruana, basó su esplendor en el desarrollo agrícola. Sus ingenieros proyectaron y construyeron canales para transportar agua desde los ríos andinos hasta los campos de los valles. Esas obras hidráulicas tenían que ajustarse a las lluvias de El Niño y a la tectónica de placas.

SECCIONES

3 

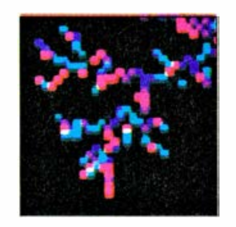
Hace...

1539: Miguel Juan Pascual es examinador de Valencia.

32 **Ciencia y sociedad**

36 **Ciencia y empresa**

80 **Taller y laboratorio**

86 

Juegos de ordenador

De cómo un tranquilo paseo por la pantalla se convierte en alboroto fractal.

90 **Libros**

96 **Apuntes**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Fase geométrica*, *Terrenos configurados* y *Juegos de ordenador*; Juan Luis Serra: *Plasticidad en el desarrollo cerebral*; Rafael Alvarado: *La fecundación en los mamíferos*; A. García: *Láseres de rayos X blandos*; L. Palacios: *Serpientes, circulación de la sangre y gravedad*; J. Alvar: *Ingenieros de canales del Perú preinca*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

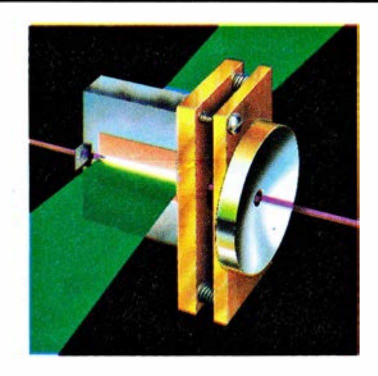
Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Alonso, David Jou, Miguel de Guzmán y Alfonso Susanna

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6	Archivo Oronoz
8-11	Laureano Carbonell
15	Moshe Kugler y Shmuel Shtrikman, Weizmann Institute of Science, Israel
16-20	Gabor Kiss
23	Nobutaka Hirokawa, cortesía de *Journal of Neuroscience* (*arriba*); George V. Kelvin (*abajo*)
24	Carol Donner
25	Torsten N. Wiesel
26	George V. Kelvin
28	Chiye Aoki y Philip Siekevitz
29	Andrew Matus
30	George V. Kelvin
40-41	Bernard Hallet, Universidad de Washington
42	William B. Krantz (*arriba*), Nelson Caine (*abajo*)
43	Roderik J. Ray, Bend Research, Inc. (*arriba*); Tom Moore (*centro*); Ekkehard Schunke, Universidad de Göttingen (*abajo*)
44	James C. Walters, Universidad del Norte de Iowa
45	Ekkehard Schunke (*arriba*); Jan Lundqvist, Universidad de Estocolmo (*centro*); Kevin J. Gleason (*abajo*)
46	Nelson Caine
49	Paul M. Wassarman
50	Neil O. Hardy
51	Paul M. Wassarman (*izquierda*), Neil O. Hardy (*centro y derecha*)
52	Neil O. Hardy
53	David M. Phillips
54	Paul M. Wassarman
57	Lawrence Livermore National Laboratory
58-59	Hank Iken
60	Lawrence Livermore National Laboratory
61	Hank Iken
65	Harvey B. Lillywhite
66	Tom Prentiss
67	Carl Roessler, Animals Animals (*arriba*); Jeff Foott, Bruce Coleman Inc. (*abajo*)
68	Harvey B. Lillywhite
69-70	Tom Prentiss
73	Field Museum of Natural History, Chicago
74-76	George Retseck
77	Field Museum of Natural History, Chicago
78	George Retseck
80	Charlie Company, Inc.
81-84	Michael Goodman
87	Kevin Eber y Jon Saken
88-89	Edward Bell



LA PORTADA, basada en una ilustración del laboratorio nacional Lawrence Livermore, muestra el primer láser de rayos X blandos (véase el artículo "Láseres de rayos X blandos", de Dennis L. Matthews y Mordecal D. Rosen, en este mismo número). Un impulso luminoso (*verde*) procedente del láser óptico más potente del mundo incide sobre las dos caras de un blanco de selenio, que es vaporizado e ionizado. Los electrones liberados por los átomos del selenio en el proceso de ionización colisionan con los iones excitados de selenio y estimulan la emisión de rayos X.

Dibujo de la portada por Hank Iken

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



Copyright © 1988 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.
Copyright © 1989 Prensa Científica S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo distintivo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

José M.ª López Piñero

...*cuatrocientos cincuenta años*

Miguel Juan Pascual fue nombrado por vez primera examinador de médicos de la ciudad de Valencia.

Nacido en Castellón hacia 1505, Miguel Juan Pascual se graduó de bachiller en artes en la Universidad de Valencia (1528) y de bachiller en medicina en la de Alcalá (1531), ampliando a continuación en Montpellier su formación como médico. De regreso a la península hacia 1535, se asentó en Valencia, donde consiguió muy pronto un sólido prestigio profesional. Además de ser nombrado examinador de médicos en varias ocasiones a partir de 1539, como hemos adelantado, fue designado en 1542 profesor de cirugía de la Universidad de Valencia. Al crearse en 1548 la nueva cátedra de práctica, pasó a ser uno de los profesores que ocuparon de modo rotatorio las tres cátedras médicas más importantes. De esta forma, durante catorce años, explicó sucesivamente "principios", "medicamentos simples y anatomía" y "práctica".

Miguel Juan Pascual publicó dos libros. El primero de ellos fue una traducción castellana del tratado de cirugía de Giovanni da Vigo, aparecida por vez primera en 1537 y reeditada después hasta comienzos del siglo XVIII. Como es sabido, la obra de Vigo corresponde al galenismo arabizado en una línea directamente basada en Avicena. En su versión castellana, Pascual la completó con "addiciones marginales" que ofrecen noticias y comentarios muy diversos, en general criticando o rectificando la orientación avicenista del autor.

En el capítulo anatómico, por ejemplo, resulta muy significativo que cite con frecuencia a Berengario de Carpi, el más importante de los anatomistas prevesalianos. Enfrenta sus opiniones con las de Avicena e incluso con las de Mondino de Luzzi, en detalles como los lóbulos hepáticos, la irrigación venosa del recto o la del yeyuno. En una ocasión recurre incluso a su propia experiencia disectiva. Frente a los que negaban la existencia del colédoco en el organismo humano normal, afirma: "Es falsa esta opinión porque la cosa monstruosa pocas veces se halla y esta vía muchas veces la vemos. Y yo la he visto".

Aunque su principal maestro en Alcalá había sido el avicenista Diego de León, el ambiente complutense favorable al humanismo y la estancia en Montpellier condujeron a Pascual a abandonar el enfoque de la patología propio del galenismo arabizado. Más tarde su convivencia en el claustro valenciano con autores como Miguel Jerónimo Ledesma, Pedro Jaime Esteve y Luis Collado, le llevaron a adoptar una postura cercana al galenismo "hipocratista". Dicha postura se refleja en su segunda obra, *Morborum internorum fere omnium et quorumdam externorum curatio breve methodo comprehensa* (1555), uno de los mejores tratados de medicina práctica publicados en la España del siglo XVI. Estudia las enfermedades en el orden habitual "a capite ad calces", dedicando una segunda parte a las fiebres. De acuerdo con la orientación citada, no solamente se basa en la observación clínica, sino también en el ambientalismo hipocrático, ofreciendo información acerca de las "enfermedades dominantes" en Valencia en años determinados. El libro fue muy apreciado en su tiempo, alcanzando once ediciones en poco más de un siglo. A partir de la cuarta (1579), fue impresa con los *Scholia* que redactó Pedro Pablo Pereda, otro médico valenciano. Además, su capítulo sobre la sífilis fue reproducido en la conocida colección de textos venereológicos del italiano Luigi Luvigini.

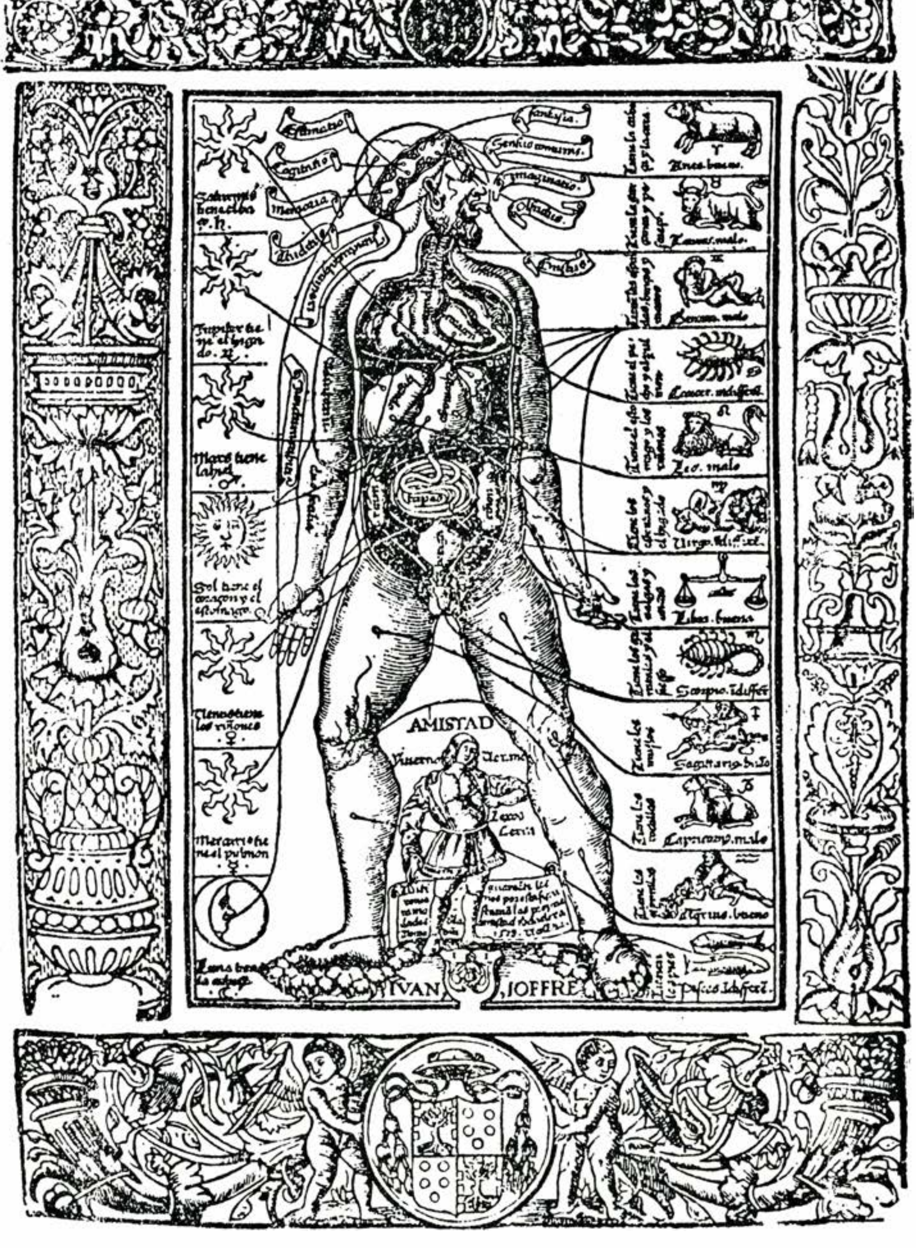
Unido a su tratado, como apéndice final del mismo, Pascual publicó un breve opúsculo titulado *An cannabis et aqua in qua mollitur possint aerem inficere* (Sobre si el cáñamo y el agua en la que se macera pueden inficionar el aire), que aparece ya en la edición de 1555. Se trata de un texto redactado a petición de los inquisidores valencianos, de los que era médico el autor, con motivo de haber opinado algunos de sus colegas que la causa de las "numerosas y graves fiebres" padecidas durante el otoño anterior en Valencia y su comarca era la fetidez de las balsas en las que se maceraba cáñamo. En él aduce las opiniones de Galeno y otros autores clásicos y contradice, como buen renacentista, la de Avicena, pero se basa ante todo en la experiencia, "en la que hay que confiar principalmente". Su dictamen es que la causa no puede ser atribuida "a las balsas en las que se macera el cáñamo" y que, en su opinión, lo que debe preocupar son las aguas estancadas que rodean la comarca y los vapores malolientes de las cloacas de la ciudad, "que siempre están abiertas".

El interés de este temprano texto sobre la contaminación justifica que ofrezcamos completa su traducción castellana:

"Algunos de los sabios médicos que han indagado la causa de las numerosas y graves fiebres que ha padecido Valencia durante el pasado otoño han opinado que todas esas afecciones, que no ha sufrido solamente Valencia sino también las localidades vecinas, hay que achacarlas a la masa de las aguas en las que se macera el cáñamo. Al conocer dicha opinión me ordenaron que diera la mía nuestros dignísimos inquisidores, de cuyas familias soy médico primario. Obedeciéndoles con mucho gusto, voy a exponer mi punto de vista.

"Los que piensan que el cáñamo y el agua en la que se introduce y macera pueden inficionar y corromper el aire intentan demostrar que el mal olor, que sería una consecuencia de la putrefacción, tiene una gran fuerza para alterar el aire que, una vez alterado, ocasiona necesariamente enfermedades. Este planteamiento parece confirmarlo Galeno en su libro *De theriaca ad Pisonem*, aduciendo el ejemplo de Hipócrates de la siguiente forma: 'Alabo a Hipócrates, que es digno de admiración por tantos motivos, porque la pestilencia procedente de Etiopía que sufrieron los griegos la trató únicamente corrigiendo la alteración del aire, de forma que no fuera más tiempo inspirada'. Además, Avicena, en la primera *fen*, libro cuarto, tratado segundo, capítulo primero (del *Canon*), parece admitir que el aire puede ser inficionado por el agua en la que se macera el cáñamo cuando dice: 'La putrefacción se produce o por una comida en mal estado, cuando está preparada, pudriéndose lo que genera por la malicia de su sustancia; o porque experimenta una putrefacción rápida, aunque sea de buena sustancia, como sucede con la leche; o debido al humor acuoso de un alimento malo que altera la sustancia de la sangre, como el producido por los frutos húmedos que tardan mucho en ser digeridos; o por uno de los alimentos que no se convierten en buena san-

gre y dejan un humor malo y frío que rehúye el calor innato y se pudre, como el que generan los pepinos, las cidras, las peras y otros frutos semejantes; o por alguna malicia de la preparación, la hora o la distribución de la que se tenga noticia; o a causa de una obstrucción que impida respirar o de una evacuación por mala complexión del cuerpo que imposibilite una buena digestión; o por circunstancias exteriores procedentes de malos aires, como el de la pestilencia, el de las charcas y el de las balsas en las que se maceran cosas como el lino y el esparto'. A continuación, Avicena expone otras causas de putrefacción, entre ellas, el ejercicio y el baño después de la comida, el sol en verano y los alimentos calientes en los postres. Sin embargo, dicho planteamiento lo contradice la experiencia, en la cual hay que confiar principalmente, según recuerda Galeno en los capítulos iniciales de su libro *De simplicium medicamentorum facultate*. En efecto, existen numerosas ciudades y poblaciones en España que son muy saludables a pesar de que en ellas se siembra y se macera una gran cantidad de cáñamo; por ejemplo, entre muchas otras, Játiva, Tarragona, Alcañiz, Requena, Utiel, Villanueva de los Infantes y Alcaraz, cuyos habitantes gozan de salud y llegan a la ancianidad. Por el contrario, existen muchas poblaciones castigadas por las fiebres en las que no se cultiva cáñamo. La misma Valencia padeció graves epidemias de peste en 1523 y 1530, años en los que no se sembraba ni se maceraba cáñamo; en cambio, desde 1530 hasta ahora se ha cultivado y macerado mucho cáñamo y no se ha generado una constitución pestilente. Estos hechos se deben a muchas razones, la primera de las cuales es que el cáñamo no sólo no altera el aire, sino que expulsa y supera la putrefacción nociva que puede engendrarse en el agua. Para aclarar esto con mayor conocimiento de causa conviene que veamos lo que los naturalistas y médicos antiguos escribieron acerca del cáñamo. Dioscórides, en el libro tercero, capítulo 141 (de su *Materia medica*) distingue dos tipos de cáñamo: uno silvestre, que mitiga las inflamaciones, resuelve las tumefacciones, deshace los tofos articulares y los cálculos, y es apropiado para hacer cuerdas; otro doméstico, cuya simiente, comida en gran cantidad, consume el esperma y cuyo zumo, instilado en los oídos, sana sus dolores. Plinio, en el libro 19, capítulo 9 (de su *Naturalis historia*) afirma que tiene mal olor cuando se siembra y cuando se arranca y que sus semillas se comen en Italia; después, en el libro 10, capítulo 23, asegura que el cáñamo silvestre es de hojas más negras y ásperas y que se dice que sus semillas consumen el esperma de los varones y que su zumo expulsa los gusanos de los oídos y cualquier otra cosa que hubiese penetrado, si hay dolor de cabeza; y que es de tanta fuerza que, echado en el agua, dicen que la coagula; y que la raíz, cocida en agua, ablanda las articulaciones contraídas, la gota y otros ímpetus semejantes. Galeno, sin duda el primero de los médicos después de Hipócrates, en el libro primero de su obra *De alimentorum facultatibus*, en el capítulo sobre las semillas del cáñamo, afirma que a algunos les gusta comerlas machacadas junto con otros postres; y en el libro séptimo de su tratado *De facultatibus simplicium medicamentorum*, reitera lo que dice Dioscórides, añadiendo que quita el flato. A la vista de la fuerza que debe tener el cáñamo para hacer todo lo que estos autores exponen, no resulta fácil creer que pueda inficionar el aire; tampoco es creíble que pueda inficionar si se tiene en cuenta que todas las hierbas y las plantas nocivas perecen en su vecindad. Si estas fuerzas del cáñamo actúan, lejos de pudrirse el agua, se expulsa lo que causa la putrefacción. El cáñamo es muy cálido y seco y claramente ígneo y



1. Grabado incluido en la edición de 1537 de la traducción castellana por Miguel Juan Pascual del tratado de cirugía de Giovanni da Vigo. Representa las "correspondencias" astrales y zodiacales de las partes del cuerpo humano

LIBER SECVNDVS.

Medica diſputatio.

An cannabis, & aqua, in qua mollitur, poſsint aerem inficere.

CVM febrium tam multarum, támque grauium, quæ proximo autumno Valentiam inuaſerunt, cauſam eruditiſſimi medici ſcrutarentur, in eam opinionem quidam inciderunt, vt hæc omnia detrimenta, quę non ſolum ad

2. *Encabezamiento del opúsculo de Miguel Juan Pascual* Sobre si el cáñamo y el agua en la que se macera pueden inficionar el aire *(1555), temprano texto sobre la contaminación*

sus fuerzas han sido expuestas por los estudiosos y las comprobamos de forma cotidiana. Está dotado de una facultad tan penetrante que los labradores la aprovechan sumergiéndolo en el agua para que, con la humedad y la frialdad, su fuerza pueda ser vencida por las cualidades contrarias; las fuerzas de estas cualidades son tan remisas en la pugna que, cuando ninguna supera a la otra, no puede generarse putrefacción nociva que, sin embargo, aparece cuando domina el calor y la humedad. Por Plinio sabemos que es de olor desagradable y que molesta a la cabeza, pero no que se pudre, pues esto ningún autor lo ha afirmado ni puede ser demostrado con razonamientos; son tan grandes su acrimonia y su facultad ígnea que puede molestar no sólo al olfato sino a la misma cabeza, pero ello no quiere decir que produzca epidemias como los médicos citados pretendían y no han demostrado con razonamientos. Ningún texto de Galeno indica que es verdadera su opinión y ni ellos fueron capaces ni ha sido comprobado que el agua de macerar el cáñamo pueda inficionar el aire, pues de lo contrario sería factible poner remedio al aire inficionado, con sólo cambiarlo. Al texto de Avicena no hay nada que oponer, porque en él no se menciona el cáñamo, pero si fuese verdadero, los lugares en los que se macera el esparto serían insalubres, lo que desmiente la experiencia, ya que la localidad del Villar, en el Reino de Valencia, es muy saludable, a pesar de que en ella siempre se está macerando esparto. Además, si en todas estas cuestiones diésemos crédito a Avicena, los alimentos de jugos dañinos por él citados, la leche en óptimo estado y muchas otras cosas, como el ejercicio y el baño después de comer y los postres calientes estarían completamente prohibidos. La zona templada, que es la más saludable de todas, no la habitan los valencianos, como el sabio Ledesma creía. Esta comarca predispone a las enfermedades húmedas y pituitosas, aunque casi todas son biliosas y por ello mueren muchos de apoplejía y hay numerosos casos de epilepsia; sin embargo, la causa de estas afecciones no puede ser atribuida a las balsas en las que se macera el cáñamo. Prescindiendo de todo esto, pienso que no hay que preocuparse de ellas, sino de otras aguas que rodean a la comarca; la zona cercana al mar es la más insalubre, como la ocupada por el palacio real y por todas las casas entre el camino de Sagunto y el mar, que no están situadas en un lugar saludable por ser las menos elevadas, ya que las zonas montañosas son más sanas. Si se considera desagradable el olor del cáñamo, mucho más lo es el de las bestias y gusanos de que está llena Valencia; si es ingrato el olor del cáñamo, peor es el de los excrementos humanos, de cuya evacuación no podemos prescindir y que es más abundante por las innumerables cloacas que exhalan un pésimo olor y siempre están abiertas. Si a los ricos les gustan las ciudades y casas salubérrimas y exentas de vapores malolientes, elijan lugares templados, altos, muy distantes del mar y de aguas estancadas, en los que no haya árboles o hierbas que puedan inficionar el aire, como el nogal, la higuera, el saúco, el eléboro, el jaramago y la col. Como con lo expuesto puede entenderse que las enfermedades pestilentes hay que atribuirlas a otra causa, no añado más argumentos, limitándome a remitir a la razón asociada a la experiencia".


Gamonal.
1918
Isaac Peral

Isaac Peral

La conciencia de los malos augurios que ensombrecían el futuro de España, en el último tercio del siglo pasado, le impulsaron a proyectar un submarino que contribuyera, desde la innovación técnica, a ahuyentarlos

Laureano Carbonell Relat

El profeta Jonás fue, sin duda, el primer hombre que hizo un largo recorrido por debajo de la superficie del agua, aunque no podemos homologarlo ni considerarlo un precedente de la navegación submarina. Cierto es que el submarino y la navegación submarina no fueron el resultado inmediato de una idea repentina. Debieron transcurrir casi trescientos años desde que el físico holandés Cornelius van Drebbel construyera en Londres, en 1620, el primer submarino aceptado como tal, hasta que la marina de los Estados Unidos encargó los de relativa fiabilidad a John Phillips Holland, oriundo de Irlanda, en 1900, que se consideran el origen de los primeros realmente prácticos, en el concepto actual.

En todo ese proceso España no estuvo tan ausente como se supone. Si dejamos a un lado la demostración práctica de la campana submarina realizada por dos griegos ante el emperador Carlos V, en el río Tajo, a su paso por Toledo, en 1538, debió transcurrir menos de un siglo hasta aparecer el primer proyecto español de un submarino. El autor fue Jerónimo de Ayanz, comendador de la Orden de Calatrava. Según los documentos existentes en el Archivo de Indias, fechados en 1603, Ayanz ideó una "barca buzo" o "barca submarina" hecha de madera recia, bien embreada y calafateada, recubierta con tela aceitada y armada con dos remos a propósito. Para la inmersión contaba con dos tornos de eje horizontal, donde se enrollaban sendos cabos amarrados a la respectiva bola de hierro de peso adecuado o, por el contrario, a unos odres hinchados. En estas condiciones, se lastraba la barca hasta que la reserva de flotabilidad fuera ligeramente positiva, o negativa. Entonces, para hacerla descender, bastaba con virar de los cabos amarrados a dichas bolas, previamente fondeadas, o arriar de los mismos cabos, sujetos ahora a los odres.

El autor del siguiente proyecto fue un escribano de Córdoba, en el año 1803. Se llamaba Rafael Covo y pretendía construir un barco de remos que "transite cubierto de agua con diversas personas que registren y puedan ver una embarcación a distancia de media legua, acercarse a ella y disparar en el centro un cañón que haga mucho estrago a el obgeto que se dirige". Pese a estas prestaciones tan prometedoras, el invento no llegó a materializarse.

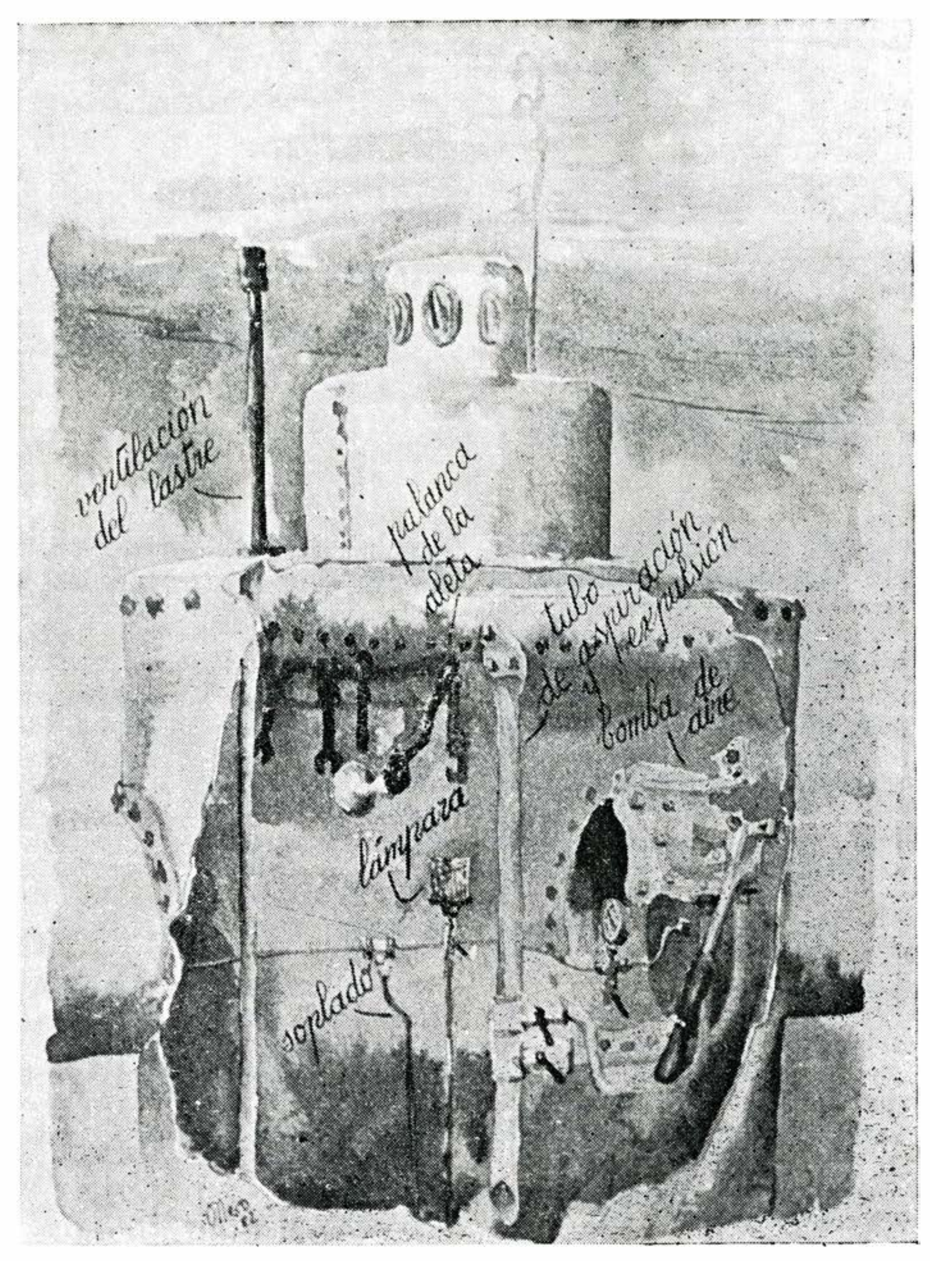
Posteriormente, Cosme García Sáez, nacido en Logroño, en 1816, hizo un modelo de submarino que probó en Barcelona en 1858. Satisfecho con el resultado lo llevó a Madrid, donde lo expuso en la calle San Hermenegildo número 1, con la pretensión de atraer la atención del gobierno, aunque sin conseguirlo. De vuelta a Barcelona proyectó un segundo submarino, mucho mayor que el anterior, que patentaría luego en París el 25 de abril de 1861. Una vez construido, lo llevó a Alicante, donde hizo una demostración pública el día 4 de agosto de 1860, según se desprende del oficio del Comandante General de Cartagena en el que trasladaba al Ministro del Ramo el del Comandante de Marina de Alicante fechado dos días antes, al decir: "A las 7 y 3/4 de la mañana del día de ayer, se hizo ... la prueba de un aparato submarino de la invención de D. Cosme García, vecino de Madrid, resultando ... que dicha máquina, que es de planchas de hierro, se sumergió con dos hombres dentro", Cosme y su hijo Juan, "permaneciendo bajo el agua veinte y siete minutos, que después ascendió a flor de agua girando varias veces ... en su superficie como entre aguas con facilidad, dando ... por concluidas las pruebas ... que duraron hasta las 8 1/2 de la propia mañana ...".

El submarino de Cosme García era una especie de bote con una torreta en el centro de la cubierta, cerrada por una tapa, y varios ventanillos acristalados repartidos por todo el casco. Llevaba además unos timones de profundidad dispuestos horizontalmente en las amuras e iba propulsado por una hélice manual cuya transmisión hacía funcionar también la bomba de achique de los tanques de lastre situados a proa y popa. Como seguridad llevaba un peso que, al soltarlo, permitía al submarino emerger rápidamente.

Su hijo, Juan García Porres, ofreció toda la documentación de la obra al Ministerio de Marina en 1898, pero se le respondió diciendo que "sólo en al-

1. ISAAC PERAL Y CABALLERO, teniente de navío e inventor del submarino al que dio nombre, según un retrato a lápiz realizado por Gamonal y existente hoy en el Museo Naval de Madrid. Nacido en Cartagena en 1851, era el mediano de los tres hijos varones de Juan Manuel Peral, capitán de Infantería de Marina, e Isabel Caballero. En 1876 se casó con María del Carmen Cencio, hija de Antonio Cencio, médico de la Armada, y de cuyo matrimonio nacerían nueve hijos. El proyecto del submarino lo hizo en su domicilio particular de la calle Juan de Mariana, 3, de Cádiz. Al retirarse de la Marina montó una fábrica de acumuladores en Madrid, cerca de las instalaciones de la Compañía General de Electricidad.

LAUREANO CARBONELL RELAT, capitán de la Marina Mercante, es profesor de la Escuela Superior de la Marina Civil de Barcelona desde 1967, donde imparte las asignaturas de dibujo e historia de la marina. Estudió en la Universidad de Barcelona la carrera de historia. Ha participado en diversos congresos y reuniones de trabajo monográficos relacionados con los temas de historia de su especialidad. Ha sido delegado de la Cruz Roja del Mar de la provincia de Barcelona y ha estado al frente del Museo Marítimo de la Diputación de Barcelona.



2. BOYA LANZATORPEDOS del industrial Antonio Sanjurjo Badía, probada en Vigo en 1898. Las dimensiones principales eran: eslora, 5,2O m; manga, 1,12 m; puntal, 3,75 m; desplazamiento, 4,25 t; velocidad, 2 nudos; cota máxima de inmersión, 2O m; dotación, 2 hombres. La parte ilustrada corresponde a la mitad superior del cilindro vertical. Se aprecian fragmentos del cilindro horizontal, más delgado.

gún caso ... excepcional podía ser considerado como arma de guerra". Contemporáneo a Cosme García fue el bien conocido Narciso Monturiol y Estarriol (1819-1885), autor de los dos submarinos nombrados *Ictíneo*. Su obra, realmente destacada y digna de elogio, incluía varios dispositivos y soluciones de gran trascendencia [véase "Los Ictíneos de Narcís Monturiol", de Santiago Riera; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1981].

Apenas conocido es el proyecto del teniente coronel Isidro Cabanyes, con la colaboración del capitán Bonet, ambos del arma de Artillería, relativo a la construcción de un torpedero submarino propulsado por energía eléctrica. En abril de 1885 ambos artilleros redactaron una memoria ilustrada con detalles del casco y de mecanismos y dispositivos de a bordo. El submarino en sí era cigarriforme, con cabezas ojivales y un diámetro interior de 2,30 m. Como desplazaba 40 toneladas, la eslora oscilaría alrededor de los 7 u 8 metros. Además, estaba concebido para alcanzar una profundidad de 50 metros e iba propulsado por dos motores eléctricos, con transmisión y hélices independientes, siendo la autonomía de 114 millas a 6 nudos y de 1041 a 2. El lastre era líquido, en tanques independientes, situados en ambas cabezas y en el plan, achicables por soplado. Además disponía de lastre sólido de seguridad, formado por una pieza de plomo de 1,3 toneladas de peso, susceptible de soltarlo a voluntad. El armamento previsto estaba constituido por tres torpedos Whitehead, alojados en los respectivos tubos de lanzamiento. La dotación era de dos o tres hombres. Es probable también que, por esos mismos años, el capitán de Ingenieros del Ejército y geógrafo Eduardo Mier y Miura (1858-1917) elaborara otro proyecto de submarino, que tampoco llegó a materializarse.

Cronológicamente, el siguiente inventor de un submarino español fue Isaac Peral; sin embargo, antes voy a hacer alusión a dos personajes algo posteriores, para completar este breve análisis retrospectivo. El primero de ellos fue Antonio Federico de la Rosa, granadino y miembro honorario de la Academia de Inventores de París, quien ideó un "submarino-torpedero" que designó con el nombre de *Zanatóforo*. Al parecer "funcionaba por efecto de la gravedad" y según su inventor permitiría superar la inferioridad de la Marina Española frente a la de los Estados Unidos en la guerra de Cuba, en 1898.

De aquella misma época y movido por idénticos ideales es la "boya lanzatorpedos" del industrial Antonio Sanjurjo Badía, propietario de un taller de fundición en Vigo. Estaba formada por dos cilindros metálicos en cruz, uno vertical, de 1,12 metros de diámetro, rematado por una torreta acristalada, destinado a alojar la máquina y el lastre líquido. El otro, horizontal y más delgado, era el depósito del aire comprimido que accionaba la máquina, y en los extremos llevaba sendos botalones con minas de contacto o torpedos. Sanjurjo hizo una demostración pública en Vigo, con todo éxito. Lamentablemente, tuvo lugar el 12 de agosto de 1898, el mismo día que se firmaba en París la paz entre España y los Estados Unidos.

Isaac Peral y Caballero nació en Cartagena el 1 de junio de 1851. Sus padres fueron Juan Manuel Peral y Torres, capitán de infantería de marina e Isabel Caballero y Díaz. Tuvo dos hermanos, Pedro y Manuel, nacidos en 1849 y 1862, respectivamente. Aprendió las primeras letras con Luis Briz, en su Cartagena natal, y siendo todavía de corta edad la familia pasó a vivir a Cádiz. El 1 de julio de 1865 ingresó en el Colegio Naval y el 26 de diciembre de 1866 obtuvo el nombramiento de guardiamarina de segunda clase.

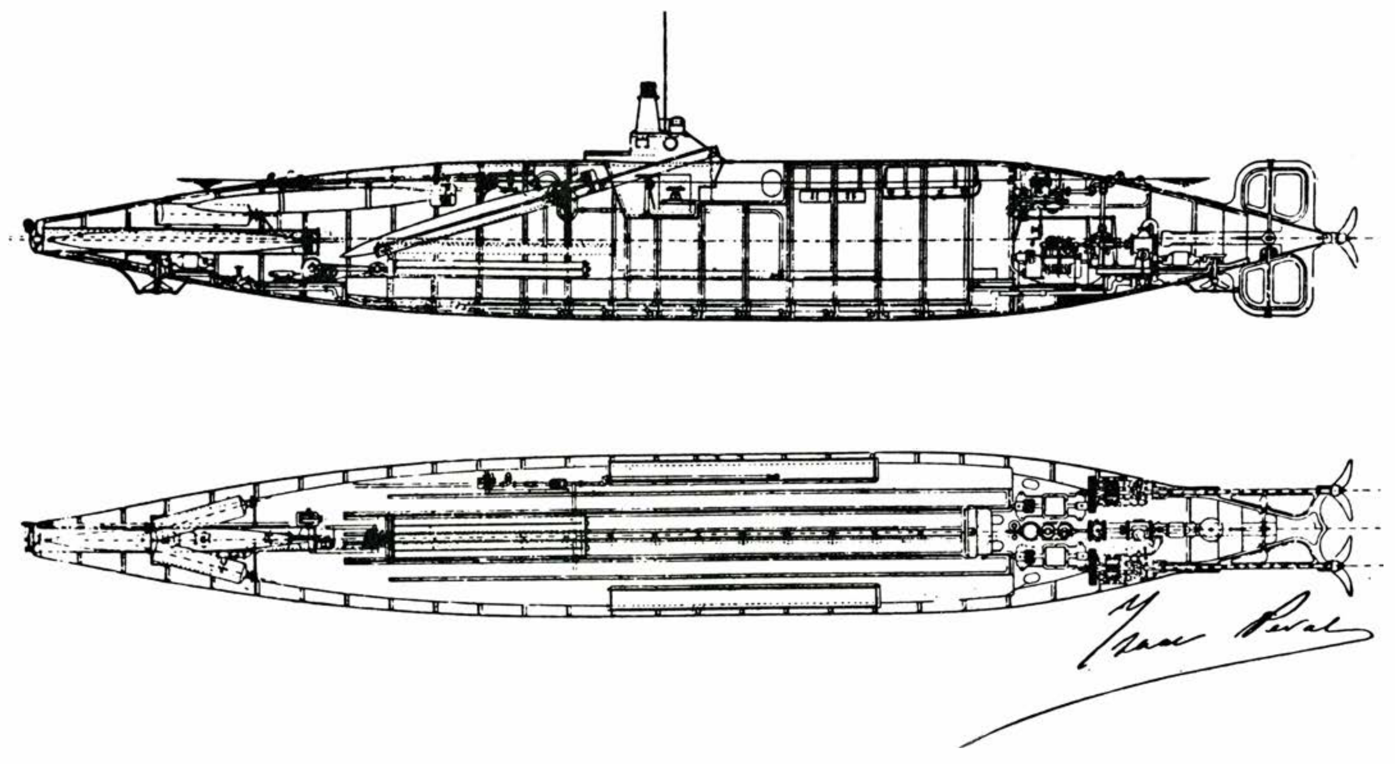
En 1870, Peral ascendió a guardiamarina de primera clase, embarcando seguidamente en la fragata *Victoria* y luego en la *Numancia*, donde formó parte de la guardia de honor que trajo al rey Amadeo I de Saboya, desde La Spezia a Cartagena, para hacerse cargo de la corona española. A partir de 1877 y durante cuatro años cursó estudios de ampliación en el Observatorio Astronómico de San Fernando.

El 1 de enero de 1881 Peral volvió al servicio activo ocupando diversos destinos en Cádiz, Cartagena y Filipinas. Fue precisamente en estas islas donde un barbero le cortó una pequeña verruga de la sien izquierda, produciéndole una herida insignificante a la que no dio ninguna importancia, pero que a la larga sería el origen del cáncer que le produjo la muerte en 1895. Además, durante la estancia allí su salud se resintió, teniendo que regresar a la península a restablecerse, donde llegó el día 8 de diciembre de 1882.

No repuesto aún de la dolencia, Peral pasó a profesar la cátedra de Física Matemática en la Escuela de Ampliación de Estudios de la Armada, en Cádiz, aprovechando los ratos de ocio para proyectar en secreto un "torpedero-submarino". Sin embargo, la ocupación alemana de las islas Carolinas, a la sazón españolas, le sacó de quicio e inmediatamente lo puso en conocimiento de los directores Cecilio Pujazón y García (1833-1891), de la Academia de Ampliación de Estudios de la Armada, y Juan Viñegra y Mendoza (1842-1918), del Observatorio de Marina. A la vista del proyecto del submarino, concebido para la defensa de los puertos, ambos directores organizaron una reunión en la cual Peral expuso la idea y explicó la solución a los problemas que la navegación submarina planteaba. El resultado fue el acuerdo de ponerlo todo en conocimiento del Ministro de Marina, vicealmirante Manuel de la Pezuela y Lobo.

El Ministro respondió de inmediato, convocando a Peral en Madrid, para que le explicara con todo detalle el resultado de sus investigaciones. De regreso a Cádiz emprendió los estudios y pruebas necesarios para redactar el proyecto definitivo. Poco después recibía un libramiento de 5000 pesetas, "a justificar" y la autorización de usar todo el apoyo humano y material que precisara del Arsenal, para que "pudiera efectuar las experiencias con la posible brevedad y conveniente reserva sobre su resultado".

En el taller montado a propósito en la Academia de Ampliación, Peral construyó el aparato de profundidades, órgano vital destinado a mantener, de forma automática, la cota de inmersión. Se trataba del dispositivo que ponía en marcha, simultánea o independientemente, los motores eléctricos acoplados a dos hélices de eje vertical, situadas en las cabezas del buque. El elemento sensible era una lámina flexible, en una de cuyas caras actuaba la presión del agua, en tanto que en la otra lo hacía un muelle, previamente regulado a la tensión correspondiente a la profundidad deseada. Cuando el submarino se encontraba a esa profundidad, la lámina no presentaba deformación alguna, por anularse ambas presiones. En este caso se mantenía cerrado un circuito secundario que hacía girar las hélices a poca velocidad, pero suficiente para compensar la flotabilidad positiva del submarino, que era de sólo 50 kilogramos, para que, llevando los tanques de lastre llenos y las citadas hélices paradas, la torreta quedara a flote. Por el contrario, cuando la tensión del muelle superaba la presión del agua, la lámina se curvaba cerrando el circuito principal y ambas hélices giraban a gran velocidad, impulsando la nave hacia el fondo, hasta quedar igualadas dichas presiones. Inversamente,



3. EL SUBMARINO *PERAL* seccionado longitudinal y horizontalmente, con la firma de su inventor. Se construyó en la ciudad de Cádiz y tenía las características siguientes: eslora = 21 m; manga = puntal = 2,74 m; desplazamiento = 79 t (a flote) y 87 t (en inmersión); lastre (agua) = 8 t; cota de inmersión = 30 m; inmersión máxima alcanzada = 10 m; velocidad máxima = 7,7 nudos (en superficie) y 3,5 (en inmersión); autonomía = 396 millas; propulsión eléctrica con 613 acumuladores de 50 kilos; motores = 2, de 30 CV; armamento = 1 tubo de lanzar con 3 torpedos marca Schwarzkopff. La puesta de la quilla tuvo lugar el 1 de enero de 1888 y la botadura el 8 de septiembre del mismo año. Las pruebas empezaron el 6 de marzo de 1889 y finalizaron el 12 de julio de 1890.

cuando la presión del agua era mayor que la tensión del muelle, la lámina se curvaba hacia el otro lado y las hélices giraban en sentido contrario, haciendo subir al submarino. En la práctica, como existía la flotabilidad positiva antes indicada, la cota de inmersión se mantenía mediante la acción intermitente de las hélices, de acuerdo con las ligeras oscilaciones verticales que se producían e inferiores en todo caso a los 30 cm de amplitud. Independiente del aparato de profundidades había un péndulo de nivelación que, al inclinarse longitudinalmente el submarino, ponía en funcionamiento las hélices hasta colocarlo horizontal. El lastre estaba constituido por ocho toneladas de agua de mar, en tanques independientes y a propósito para regular el asiento y la escora del submarino. Este lastre se podía achicar por cuatro sistemas, dos mediante bombas con motor eléctrico, una de 6 caballos de vapor y la otra, de emergencia y portátil, de medio caballo de vapor; los otros dos restantes eran por soplado con aire inyectado por la bomba o utilizando el de los depósitos destinados a la respiración.

En noviembre de 1885, Peral solicitó la constitución de una comisión técnica para presenciar las pruebas, empezando por la de mantener a varias personas en condiciones soportables de respiración, en un espacio cerrado herméticamente, durante seis horas. Tuvo lugar el día 15 de diciembre de 1885, en una habitación del antiguo taller de jarcias del Arsenal de La Carraca, debidamente acondicionada, y constituyó un rotundo éxito, según reconocieron todos los asistentes.

El 24 de marzo de 1886, después de varias demostraciones previas del aparato de profundidades ante el Capitán General del Departamento, Peral pasó a Madrid para repetirlas ante el Ministro de Marina. A la vista del excelente funcionamiento se hizo, además, una en presencia de la reina Isabel II en persona y del Ministro de la Guerra. La reina le brindó su apoyo, que se concretó en una Real Orden fechada el 4 de octubre de 1886 disponiendo se le facilitaran "... toda clase de auxilios en personal obrero y material ... sin limitación alguna, considerando esos trabajos como preferentes a cualquier otro del Arsenal. Es también voluntad de S.M. se abra por ahora un crédito de veinticinco mil pesetas para adquirir material y aun personal, recomendándose en todo la más absoluta reserva". El decreto proseguía diciendo que la construcción del casco y del motor "... deberá empezar tan pronto quede el servomotor en función", nombre que indicaba el aparato de profundidades.

Poco después, el 11 de junio de 1886, Peral presentó en Madrid los planos del proyecto definitivo. En honor a la verdad el inventor contó con el consejo del ingeniero naval José Castellote, discípulo de Andrés Avelino Comerma y Batalla. También le sirvieron de mucho las charlas que había sostenido con su amigo y compañero José Luis Díez y Pérez, fallecido unos años antes, gran conocedor de la electricidad y artífice de la instalación y electrificación del Arsenal de La Carraca, así como las observaciones de Pedro Mercader Zufia y Manuel Cubells Serrano, luego tripulantes del submarino.

El 17 de marzo de 1887, terminado ya el aparato de profundidades, se urgió a Peral la presentación del presupuesto de la construcción del submarino. Lo hizo al día siguiente, siendo el importe de la nave, con tres torpedos y el tubo de lanzar, 295.500 pesetas, cantidad que se reducía a sólo 216.500, si se prescindía de dichos elementos ofensivos.

REGIMEN	POTENCIA	VELOCIDAD		AUTONOMIA	
		PROYECTO	PRUEBAS	PROYECTO	PRUEBAS
BATERIAS	(CV)	(NUDOS)	(NUDOS)	(MILLAS)	(MILLAS)
1/4	2 1/2 (*)	3,–	–	396	–
1/4	5	4,7 y 4,3 (**)	3,7	284 y 335	200
1/2	16	6,9 y 6,–	5,–	132	90
3/4	33	8,9 y 8,–	7,–	–	–
ENTERAS	60	10,9 y 10,–	7,7	–	–

(*) Con un solo motor.
(**) El primer valor corresponde al consignado inicialmente por Peral y el segundo, algo inferior, otro posterior indicado por él mismo.

4. TABLA ILUSTRATIVA DE LAS PRESTACIONES del submarino *Peral*, según la proporción de baterías aplicadas a la propulsión y, por tanto, de la potencia desarrollada por los motores eléctricos del mismo.

El Real Decreto de fecha 20 de abril de 1887 aprobó la construcción, con caracter de urgencia y un presupuesto de 295.500 pesetas, del submarino proyectado por Peral, a quien se le encomendaba la dirección de la obra, recomendándole el empleo de materiales de procedencia española, salvo "... aquellos ... que el inventor considere reservarse una libertad absoluta en la elección, para mayor seguridad del éxito".

El 21 de mayo de 1887 Peral fue de nuevo a Madrid y desde allí al extranjero, en busca de equipo para la obra, adquiriendo aparatos ópticos, en París; accesorios y torpedos, en Berlín; acumuladores en Bruselas y aceros, motores eléctricos, hélices y tubos lanzatorpedos, en Londres. El día 16 de septiembre de 1887 Peral se encontraba de regreso en Madrid y una semana más tarde, en San Fernando.

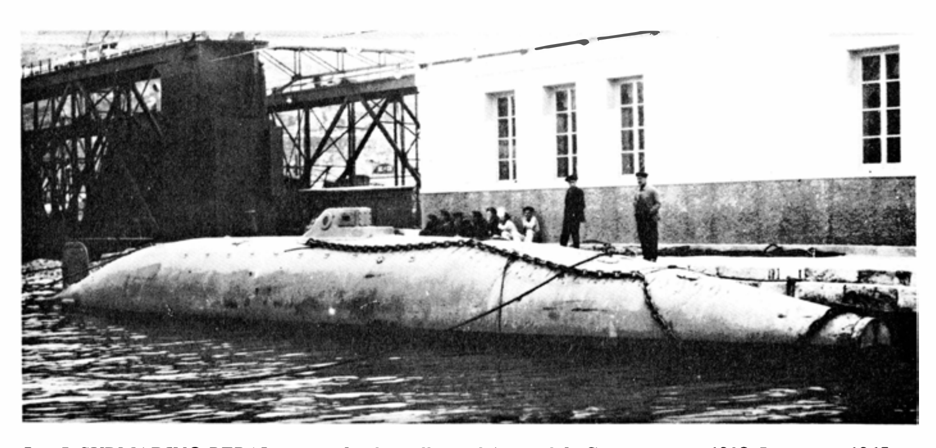
La utilización de la electricidad en la propulsión constituía una novedad, introducida en España por Isaac Peral. Apenas una década antes algunos físicos la definían aún como: "un fluido desconocido que quemaba y no podía ser ponderado". Anteriores a él en el empleo de la energía eléctrica en la propulsión de submarinos fueron: Alstitt, en Estados Unidos (1862); Drzewiecki, en Rusia (1884), y Campbell-Ash, en Inglaterra (1885). Posteriores a su proyecto de 1885, aunque no a su puesta en práctica, fueron Goubet, en Francia (1886); Waddington, en el *Porpoise*, en Inglaterra (1888), y Gustave Zédé y Dupuy de Lôme, en el *Gymnote*, en Francia (1888).

Entre los días 15 y 20 de octubre de 1887 llegaron al Arsenal de La Carraca los primeros contingentes de hombres para trabajar en el submarino, cuya obra empezó el día 23 de dicho mes. La quilla se puso el día 1 de enero del año siguiente y a partir de entonces los trabajos prosiguieron a buen ritmo hasta el día 26 de julio de 1888, en que al suprimirse el pago de horas extras avanzaron con más lentitud.

El día 2 de agosto de 1888 se trasladó a Peral una Real Orden disponiendo: "Que sin dejar su destino de profesor de dicho centro", refiriéndose a la Academia de Ampliación, "se encargase del mando, como Comandante, del torpedero submarino de su invención ...". El 8 de septiembre de 1888 tuvo lugar la botadura del submarino. El 29 de noviembre de 1888, Peral propuso las pruebas generales y parciales del submarino, las cuales, con ligeros retoques, fueron aceptadas. Para asistir a

ellas, el 22 de febrero de 1889, Isabel II nombró al General de la Armada que desempeñaba el cargo de ayudante suyo, quien delegó en el capitán de fragata Antonio Armero, ayudante personal de órdenes de la propia reina y miembro de la dotación del submarino desde siete días antes, así como al teniente de navío Pedro Novo y Colson.

A principios del mes de marzo de 1889 finalizó la construcción del submarino y el día 6 se hizo la primera prueba de velocidad, en la que se averió el motor de babor, por defectuoso, optando el fabricante por cambiarlo.



5. EL SUBMARINO *PERAL* amarrado al muelle en el Arsenal de Cartagena, en 1928. Luego, en 1965, se convirtió en monumento público, al ser instalado en el paseo de la Muralla a la vista del dedicado a los héroes de Cavite y Santiago de Cuba. La finalidad del proyecto de Peral era el establecimiento de un dispositivo de defensa costera por medio de submarinos, con las bases y unidades indicadas a continuación: Rosas (2), Barcelona (3), Tarragona (2), Palma (2), Mahón (3), Valencia (2), Alicante (2), Cartagena (4), Almería (2), Málaga (2), Algeciras (6), Cádiz (4), Ría de Vigo (2), Ferrol (4), Gijón (2), Santander (2) y Pasajes (2).

A partir de entonces se hicieron diversas pruebas de los mecanismos y dispositivos del submarino, además del montaje del nuevo motor, que quedó instalado el 19 de junio. Luego se procedió a la carga de baterías y una vez probados los motores con el submarino fondeado y amarrado con coderas, se iniciaron las pruebas de velocidad con la mitad de las baterías, que dieron un andar de unos cinco nudos en plena bahía de Cádiz.

El día 26 de julio de 1889 empezaron las pruebas del programa establecido, con la realización de ejercicios de respiración a bordo, con el submarino cerrado herméticamente, sin utilizar el purificador ni el aire contenido en el tanque a presión. Duraron tres horas y el resultado fue satisfactorio. Dicho purificador consistía en una caja de hierro, mediada de una solución muy concentrada de sosa cáustica, a través de la cual se bombeaba el aire del submarino para que se saturara de humedad y cediera el anhídrido carbónico. Simultáneamente, otra bomba aspiraba el aire viciado que expulsaba al exterior, mientras la atmósfera del submarino se enriquecía mediante el aire comprimido del tanque a propósito.

Los días 1, 3, 5 y 7 de agosto de 1889 tuvieron lugar las pruebas de inmersión a distintas profundidades, en el dique número 2, reguladas con el aparato de profundidades, así como ejercicios de achique de compartimentos. En ellas se apreció el rezumadero de los remaches de la parte alta de la torre óptica, lo que obligó a repararla y finalmente, el día 7, se realizó la inmersión total sin ningún problema.

Del día 10 al 24 de agosto de 1889, el submarino estuvo en dique donde se le pintaron los fondos y sustituyó una válvula, además de recargar las baterías. A la salida del dique se compensó la aguja. Adviértase, a este respecto, que una aguja o compás magnético instalado en el interior de un casco de acero, como sucede en un submarino, pierde toda la fuerza directriz y queda inútil. Peral solucionó el problema colocándola en la torreta, que tuvo la precaución de hacer de bronce, y acoplando a la bitácora un dispositivo de reflexión que permitía al timonel realizar cómodamente la lectura del rumbo. Igualmente resolvió el problema de la visión exterior con la torre óptica de visión indirecta, consistente en una especie de periscopio formado por un conjunto de prismas y de lentes que proyectaban la imagen externa sobre una mesa, apreciándose las distancias mediante un cuadriculado a propósito.

El día 3 de septiembre de 1889 tuvieron lugar las pruebas de estabilidad. Se comprobó que, navegando con marejadilla de través, el submarino daba unos balances de 10 a 20 grados, en tanto que recibiéndola de proa las cabezadas eran insignificantes. Tales balances serían considerados excesivos por la comisión, convirtiéndose en un argumento más en contra del submarino. Seguidamente se dispararon los tres torpedos, con la única incidencia de que el tercero recorrió tan sólo unos 50 metros antes de hundirse, aunque la lancha de apoyo pudo recuperarlo el día siguiente.

Entre los días 16 de octubre y 25 de noviembre de 1889, el submarino entró en dique dos veces, en las que se cambió una válvula de fondo, regularon los pesos de a bordo, efectuaron pruebas de inmersión y resistencia pasiva de los propulsores, así como limpiaron fondos y cargaron baterías.

El día 30 de noviembre de 1889 dieron comienzo las pruebas de inmersión del *Peral* en mar abierto, alcanzando la profundidad de siete metros, la máxima que permitía el fondo del lugar, y repitiéndolas al día siguiente en que llegó a los 7,5 m.

Poco después empezaron las pruebas de disparo de torpedos y de navegación en inmersión. Lamentablemente el 14 de diciembre de 1889 el submarino colisionó con un falucho cargado de sal y, pese a no apreciarse ninguna avería, Peral creyó conveniente regresar a la base como medida de seguridad. Al día siguiente salió de nuevo e hizo las pruebas de disparo de torpedos con resultado satisfactorio. El día 17 se realizaron las de navegación en inmersión, utilizando los timones horizontales y el aparato de profundidades. Finalmente, el día 25 de diciembre el submarino navegó sumergido a una profundidad de 9 metros, con tan buenos resultados que Peral dio por resuelto el problema de la navegación submarina, "... en vista de la seguridad obtenida en cuantos movimientos se ha propuesto", según sus propias palabras. El día 16 de enero de 1890 tuvieron lugar otras pruebas de torpedos y con ellas se dieron por finalizadas las relativas a este particular.

Hasta aquí hemos omitido las dificultades de Peral en la ejecución del invento. De hecho, las tuvo de todo tipo, incluyendo algunas de difícil justificación, como fueron el encontrar las baterías llenas de tinta roja, en vez del bicromato de potasa que debían contener, cuando iba a hacer la demostración del aparato de profundidades en Madrid, en marzo de 1886; aparecer rota la pala de una hélice un poco antes de proceder a la botadura del submarino, el día 8 de septiembre de 1888, o

abrirse la válvula atmosférica durante la prueba de navegación en inmersión con rumbo fijo, el día 7 de junio de 1890, que a pesar de producir la inundación parcial del submarino no tuvo más consecuencias.

Luego, desde principios de 1890 la normalidad con que venían desarrollándose las pruebas desapareció. Por todos sitios empezaron a surgir pequeños conflictos, aparentemente sin importancia, que aumentaron de forma ostensible a raíz del escrito del Capitán General de fecha 27 de marzo, comunicando a Peral que, teniendo en cuenta la memoria presentada por el inventor el día 20 de febrero y los partes de las pruebas realizadas hasta entonces, la comisión había acordado someter al submarino a unas pruebas adicionales de velocidad, radio de acción, navegación en inmersión, disparo de torpedos, invisibilidad y de mar. Estas pruebas querían ser, en esencia, las consideradas como "las más idóneas" en el programa establecido, aunque algunos suponen que la comisión las impuso para conseguir un protagonismo del que carecía. Lo cierto es que Peral se molestó bastante, pues consideró que la realización de las mismas iban a alargar mucho el período de experiencias, que ya era suficientemente prolongado. Además, Peral se quejó alegando que algunas de ellas implicaban unas prestaciones muy superiores a las previstas en el proyecto.

En lo relativo a velocidad y radio de acción se entabló, en particular, una disputa epistolar sobre ciertos detalles de interpretación. Finalmente, una vez despejadas todas las dudas, se iniciaron las pruebas el día 21 de mayo de 1890, aunque el mal tiempo obligó a suspenderlas. Se reanudaron los días 22 y 26 del mismo mes, para culminar el 1 de junio. Lamentablemente no dieron el resultado previsto en el proyecto, por lo que en su día se convertirían en un sólido argumento de la comisión para rechazar el submarino.

Los días 6 y 7 de junio de 1890 tuvieron lugar las pruebas de navegación en inmersión. Consistieron en hacerlo a diferentes profundidades, hasta alcanzar los nueve metros y culminaron con la navegación sumergido a diez metros, manteniendo el rumbo fijo durante una hora. El éxito de la prueba fue rotundo y los resultados se difundieron por el mundo entero.

El día 21 de junio de 1890 se hicieron pruebas de disparo de torpedos e invisibilidad, con un simulacro de ataque al crucero *Colón*, que debía navegar del modo establecido previamente mientras el submarino *Peral* estuviera en inmersión. La prueba exigía el disparo de tres torpedos, con punta de ejercicios, desde una distancia en que fueran eficaces y sin haber avistado al submarino. Por aquel entonces, el alcance de los torpedos era solamente de seiscientos metros. En las pruebas efectuadas de día, se hicieron tres intentos y el *Colón* lo avistó a 1200, 800 y 400 metros de distancia, respectivamente, antes de que pudiera dispararlos. El submarino no satisfizo, por tanto, lo que la comisión había exigido. En cambio, en las de noche, sucedió todo lo contrario, pues pudo acercarse hasta 200 metros del *Colón*, haciendo los tres disparos sin ser visto y con toda impunidad.

En descargo del fracaso del simulacro de ataque de día es de destacar que a bordo del *Colón* había más de doscientas personas totalmente pendientes de las evoluciones del submarino, por lo que era del todo imposible que pudiera pasar desapercibido. A esto cabe añadir que la exigencia impuesta al *Peral* era realmente excesiva. La misión fundamental que podía esperarse de él era sustituir a los torpederos tan en boga por razón de su superior inmunidad. Y esto sí que estaba en condiciones de asumirlo. En el peor de los casos, navegando con la torreta a flor de agua, la relación entre la superficie visible de la misma y la de un torpedero estaba en la proporción de 0,35 a 13, algo así como el 2,7 por ciento de la de aquél; además, dicha torreta, a 500 metros de distancia, era un blanco imposible de acertar con ninguna de las armas existentes por aquel entonces. El día 3 de julio de 1890 comenzaron las pruebas de mar, para seguir el día 6 y terminar el 12. En ellas se determinó la velocidad del submarino navegando con los motores conectados a un número variable de baterías.

Posteriormente, el Consejo Superior de la Marina en sesión celebrada el 27 de septiembre de 1890 dictaminó, apoyándose en el informe desfavorable de la comisión, que el *Peral* "no llenaba las condiciones que su autor se había prometido, siendo la causa, su falta de práctica, sin duda, en la ciencia de las construcciones navales". De todos modos, el dictamen añadía que Peral se podría encargar "de construir otro nuevo submarino, con arreglo a planos que él presentara...".

Peral no desistió en su empeño y procuró lograr la orden de construcción del segundo submarino al que aludió el Consejo Superior de la Marina, en el que podría subsanar las deficiencias observadas en el primero. Por desgracia la orden no llegó nunca.

Poco después, Peral cesó como Comandante del submarino, haciendo entrega del mismo y de todo el material a su cargo, "para utilizar en la construcción de un nuevo submarino cuando se estimara conveniente". Luego, el 12 de diciembre de 1890, obtuvo una licencia de dos meses por enfermedad, que aprovechó para trasladarse a Madrid, donde el doctor Federico Rubio le hizo una primera intervención del cáncer que venía padeciendo. Posteriormente, el 15 de enero de 1891 y a petición propia, la Marina le concedió la licencia absoluta. Poco después, el día 24 de mayo de 1895, a la edad de 45 años, fallecía en Berlín, donde había sido intervenido quirúrgicamente.

Cuanto antecede es, en síntesis, la historia del submarino de Isaac Peral. Las consecuencias más destacadas a que dio lugar fueron, sin duda, la gran frustración del autor y de todos los españoles que habían puesto todas sus esperanzas en la obra. El submarino de Peral tenía algunos defectos, pero es preciso reconocer también la imposibilidad de construir un prototipo y pretender que funcione de inmediato y al primer intento. Los defectos del submarino eran subsanables con facilidad y se habría resuelto con la construcción de una nueva unidad, tal y como estaba previsto. Desgraciadamente, ésta no se hizo. No es mi intención caer en el pozo sin fondo de pretender deducir quién tenía razón o a quién corresponde la culpa, pero sí lamentar que la falta de entendimiento y, por qué no, de comprensión entre Peral y la comisión primero y luego entre aquél y el Consejo Superior de la Marina impidiera a España entrar por sus propios medios en la construcción naval de submarinos, cuyas unidades constituyen hoy uno de los principales elementos estratégicos de las más destacadas potencias de nuestro tiempo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL PROFUNDO ISAAC. DOCUMENTOS INÉDITOS DEL ARCHIVO DE ISAAC PERAL Y CABALLERO. Antonio Isaac Peral. Madrid, 1934.

EL ARMA SUBMARINA ESPAÑOLA. Manuel Ramírez Gabarrús. E. N. Bazán de C. N. M., s/l, 1983.

REVISTA GENERAL DE MARINA, noviembre y diciembre de 1890.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

La fase geométrica

Un circuito que describe una curva cerrada en un espacio abstracto puede explicar lo mismo un curioso desfase en la función de onda de una partícula que la rotación aparente que sufre el plano de oscilación de un péndulo

Michael Berry

Tome un lápiz y apóyelo sobre un costado en el polo norte de un globo terrestre. La punta estará señalando hacia uno cualquiera de los meridianos, que son las líneas de longitud constante que parten del polo. Haga deslizar el lápiz a lo largo de ese meridiano, bajando hasta el ecuador; después, manteniendo el lápiz perpendicular al ecuador, desplácelo hasta otro meridiano. Retorne al polo norte a lo largo del nuevo meridiano y descubrirá que, a pesar de que el lápiz ha regresado a su punto de partida, sin hacerlo girar en ningún momento, ya no apunta en la dirección del meridiano primitivo.

Este sencillo ejercicio ilustra la forma en que el "transporte paralelo" de un vector (los vectores son magnitudes que poseen longitud, dirección y sentido) a lo largo de un circuito trazado sobre una superficie curva tiene por efecto una anholonomía, esto es, la incapacidad de ciertas variables que describen un sistema para retornar a sus valores primitivos. La anholonomía del ejemplo proviene de que el lápiz fue obligado a describir un circuito sobre la superficie de una esfera, siendo mantenido en todo momento paralelo a los meridianos. Se trata de un fenómeno puramente geométrico; no depende de la energía ni de la masa del lápiz. Además, no depende tampoco de su posición inicial. La amplitud de la anholonomía depende exclusivamente del área de la superficie encerrada en el circuito y de la curvatura de la misma.

Descubrí en 1983 la existencia de un efecto geométrico similar en las ondas cuánticas que describen a las más pequeñas escalas la materia y sus interacciones. En este caso, la anholonomía se presenta en la función de onda de un sistema (la descripción matemática del estado físico de un sistema) después de que el sistema se haya transportado a lo largo de un circuito cíclico sobre una superficie abstracta del "espacio de parámetros". He dado a esta anholonomía el nombre de fase geométrica, porque se manifiesta específicamente como un decalaje o corrimiento de la fase de la función de onda: la magnitud que describe en qué punto de su ciclo oscilatorio se encuentra la función de onda en un lugar e instante dados.

Resulta que la fase geométrica proporciona una elegante explicación de diversos fenómenos cuántico-mecánicos propios de sistemas cuyo ambiente experimenta cambios cíclicos: neutrones que pasan a través de un campo magnético helicoidal, luz polarizada que viaja a lo largo de una fibra óptica bobinada y partículas cargadas que circundan un campo magnético aislado. Tal vez sea más sorprendente todavía que la fase geométrica pueda también generalizarse y aplicarse en la física clásica. Entre otras cosas, ofrece una forma nueva de describir la conducta de objetos tan típicos de los libros de texto como el péndulo.

Descubrí la aplicabilidad general de la fase geométrica en la mecánica cuántica mientras estudiaba estados cuánticos estacionarios, estados que pueden adoptar ciertos sistemas microscópicos en el seno de ambientes invariables. Un átomo de hidrógeno aislado nos proporciona un ejemplo de estado cuántico estacionario, dado que el único electrón de este átomo se mueve en el seno del campo eléctrico invariable creado por su núcleo. En tal estado (que se encuentra caracterizado por un sistema particular de números cuánticos), las medidas del átomo proporcionarán en todo momento el mismo resultado, a excepción de los corrimientos de fase de la función de onda que describe al sistema, que carecen de importancia.

Tales corrimientos de fase son resultado de la fase dinámica inherente a cualquier onda, sea clásica o cuántica. Para mejor comprender qué es la fase dinámica tomemos un ejemplo familiar: la onda estacionaria que se crea al agitar el extremo de una cuerda larga, firmemente sujeta por el otro extremo. Una serie de instantáneas de la cuerda mostrarían que aquellos puntos que se encontraban en la cresta de una onda en una de las fotos ya no ocupan las crestas en otras (salvo en el caso de que las fotografías estén sincronizadas con la onda). Dicho de otra forma, la fase de la onda cambia de unas fotografías a otras. El ritmo al que cambia de este modo la fase de la onda es igual a la frecuencia instantánea de la onda, que para un estado cuántico estacionario es proporcional a la energía del estado. Dado que la fase dinámica no altera en modo alguno la energía o la extensión espacial de la función de onda de un sistema, no tiene influencia sobre el sistema cuando éste se encuentra en estado estacionario.

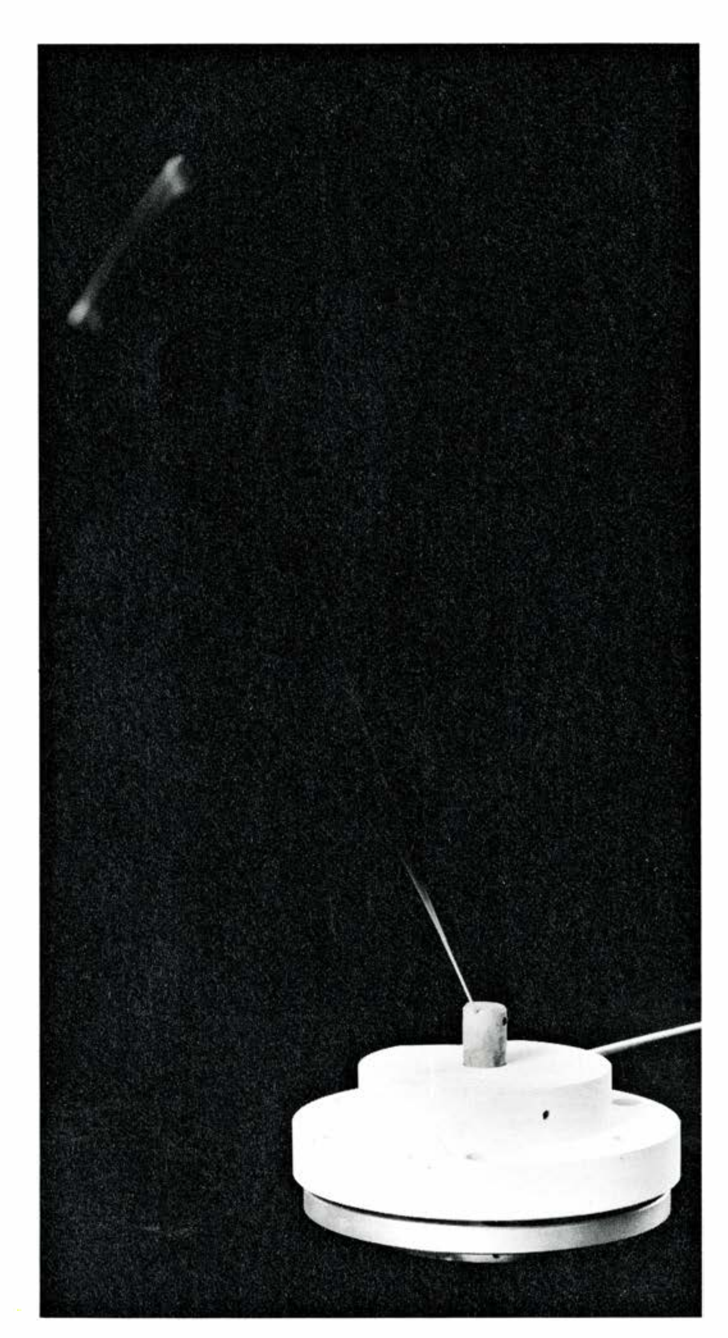
El estudio de los estados estacionarios constituye la estática cuántica. Sin embargo, la estática sólo da cuenta de una parte de la física, ya sea clásica o cuántica. La otra parte es la dinámica, que se ocupa de las fuerzas variables y de las transiciones entre los diferentes estados estacionarios. La especialidad que particularmente me interesó se encuentra en la divisoria entre estática y dinámica; estaba yo estudiando los efectos producidos en un sistema por cambios muy lentos en su ambiente. Estos cambios ambientales lentos, llamados cambios adiabáticos, son objeto de un teorema de gran importancia, originalmente enunciado a extramuros del marco cuántico-mecánico formal por Albert Einstein y Paul Ehrenfest

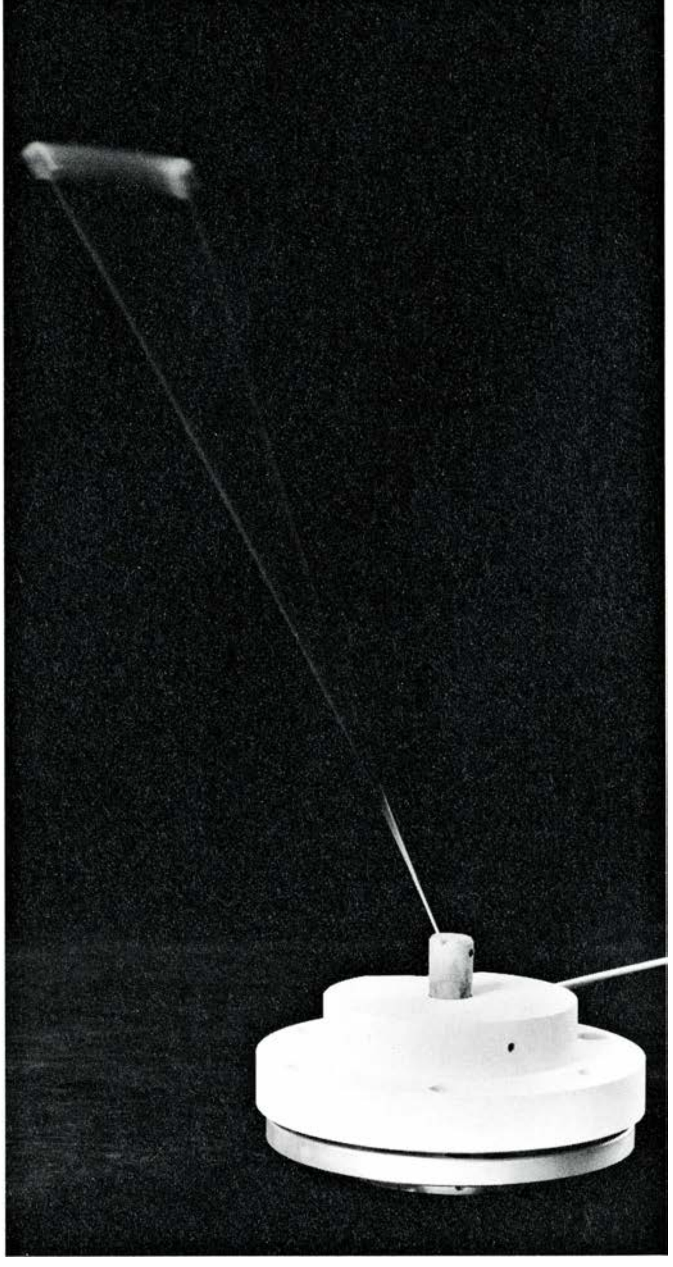
MICHAEL BERRY, profesor de física en la Universidad de Bristol desde 1965, se dedica al estudio de los aspectos geométricos de las ondas, en particular los que establecen puentes entre la mecánica cuántica y la clásica.

en 1911, y rigurosamente demostrado después en el seno de la teoría cuántica por Max Born y Vladimir A. Fok en 1927.

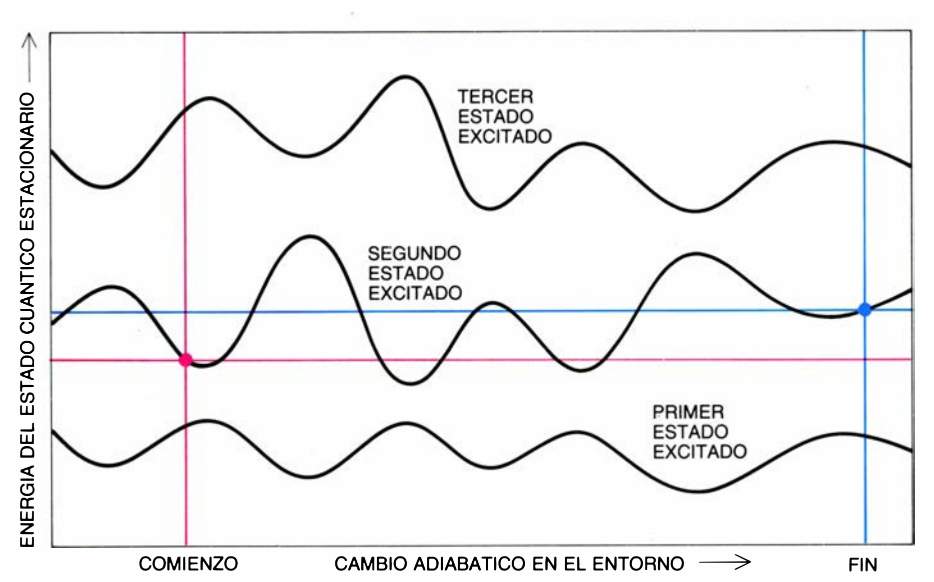
Según el teorema adiabático cuántico, un sistema que inicialmente se encuentre en un estado estacionario caracterizado por cierto conjunto de números cuánticos permanecerá en estado estacionario descrito por el mismo sistema de números cuánticos, aun cuando su ambiente pueda estar cambiando, con tal de que lo haga lentamente. La potencia del teorema reside en el hecho de que los ambientes inicial y final –y, por tanto, la forma real de los estados estacionarios a ellos asociados– pueden ser francamente diferentes: la condición adiabática estipula solamente que el cambio ambiental sea lento, no que sea pequeño. (Si el cambio no es lento, el teorema no es de aplicación, y el sistema efectuará transiciones a estados caracterizados por otros números cuánticos.)

Es posible que la aplicación más útil del teorema adiabático sea para la determinación aproximada de los estados cuánticos de una molécula, que es una colección de núcleos y de electrones en constante movimiento. La solución exacta de la ecuación que determina el comportamiento cuántico de la más sencilla de las moléculas (la molécula de hidrógeno ionizada, que tiene dos protones y un electrón) se ha resistido a todos los esfuerzos de los físicos. Sin embargo, debido a que las masas de los núcleos son millares de veces mayores que las de los electrones, se puede considerar que se mueven mucho más lentamente que éstos. Dado que los núcleos constituyen el "ambiente" de los electrones, podemos decir que los estados electrónicos evolucionan adiabáticamente al moverse los núcleos. El movimiento continuo de los núcleos puede, así pues, quedar fragmentado en una secuencia de configuraciones "a foto fija", cada una de las cuales posee estados cuánticos dados por los corres-





1. ANHOLONOMIA –fenómeno subyacente a la fase geométrica–, puesta aquí de manifiesto por un dispositivo construido por Moshe Kugler y Shmuel Shtrikman, del Instituto Weizmann de Ciencias, en Israel. Por anholonomía debe entenderse aquel efecto geométrico en el cual variables que describen un sistema no retornan a sus valores originales después de que el sistema completa una revolución. En el dispositivo, un alambre inserto en una base se hace vibrar en un cierto plano (*izquierda*). Se hace girar lentamente la base. Al cabo de una revolución (*derecha*), el alambre no vibra ya en el mismo plano predecente.



2. CAMBIOS ADIABATICOS en el ambiente de un sistema; se producen con lentitud suficiente como para que el sistema permanezca continuamente en equilibrio con su ambiente. Ante un medio estático, los sistemas adoptan normalmente alguno de los llamados estados estacionarios (caracterizados por un conjunto de números cuánticos). Empero, según el teorema adiabático cuántico, un sistema en estado estacionario puede permanecer en un estado estacionario caracterizado por el mismo conjunto de números cuánticos a pesar incluso de que cambie el medio, con tal de que los cambios sean adiabáticos. El teorema sigue manteniéndose válido aun cuando la energía y el ambiente finales sean muy distintos de la energía y ambiente iniciales.

pondientes estados estacionarios de los electrones.

Dado que un sistema cuántico inmerso en un ambiente que varíe con lentitud permanece en estado estacionario, podría parecer que un cambio adiabático no comporta, en realidad, cambio alguno. Tal fue, en cualquier caso, la opinión prevaleciente entre los físicos durante muchos años, y por tal motivo se pasó por alto un curioso y sutil efecto que los cambios adiabáticos ejercen sobre la fase de una función de onda.

Fijémonos en la fase de la función de onda de un sistema cuántico que haya experimentado un cambio adiabático cíclico, esto es, una transformación que deja el ambiente en el mismo estado que tenía antes de comenzar el proceso. Aunque los estados inicial y final del sistema serán exactamente el mismo, las fases de las funciones de onda inicial y final serán diferentes, pues la fase dinámica de la función de onda depende del tiempo. Esta diferencia de fase existiría, aun cuando no cambiase el ambiente; no es más que reflejo del tiempo que necesitó el sistema para completar el ciclo.

Todo esto era perfectamente conocido. Yo logré demostrar que cualquier cambio adiabático cíclico puede provocar el corrimiento de la fase de la función de onda de otra forma bastante sorprendente, y deduje a partir de la física cuántica una fórmula para la nueva fase. La fórmula resulta más fácil de comprender representando los cambios lentos del ambiente mediante un circuito cerrado, trazado en un sistema de coordenadas cuyos ejes corresponden a parámetros, es decir, variables físicas que describen el ambiente del sistema. Salta a la vista la analogía con el ejemplo del lápiz y el globo terráqueo; el corrimiento de fase puede considerarse resultado de una anholonomía que surge siempre que se hace que el sistema recorra un circuito completo sobre una superficie curva del espacio de parámetros.

En efecto, como ha reconocido Barry M. Simon, del Instituto de Tecnología de California, el análisis matemático del transporte paralelo de un vector a lo largo de un circuito contenido en una superficie curva proporciona (una vez debidamente generalizado) la misma respuesta que la fórmula para la componente de fase que yo obtuve a partir de la física cuántica. Al igual que en el ejemplo del lápiz y la esfera terrestre, resulta posible calcular el corrimiento de fase a partir del área y la curvatura de la porción de superficie encerrada en el circuito.

Debido a que tal corrimiento de fase depende sólo de la geometría del circuito en el espacio de parámetros, lo he denominado fase geométrica. La fase geométrica es independiente del tiempo que invierta el sistema en recorrer por completo el circuito (siempre y cuando el proceso se desarrolle con lentitud suficiente para que el cambio sea adiabático); en cambio, es sensible a la forma del circuito y al estado cuántico inicial del sistema. Por consiguiente, podemos considerar que la fase geométrica proporciona la respuesta mejor que puede ofrecer el sistema ante la pregunta: "¿Qué senda tomó el sistema en el seno del espacio paramétrico?" A este respecto, es una especie de "memoria" cuántica: contiene información relativa a los ambientes pasados que tuvo el sistema.

Desde que establecí la aplicabilidad teórica de la fase geométrica en cualquier cambio cíclico adiabático, ésta se ha calculado para una diversidad de sistemas que describen ciclos a lo largo de una variedad de circuitos de espacios de parámetros. El fenómeno se ha medido experimentalmente en espines cuánticos a los que se ha "girado" lentamente. Podemos hacernos una burda imagen del espín cuántico de una partícula pensando en una diminuta peonza que gira en torno a un eje. Los estados estacionarios de espín de una partícula están caracterizados por un número cuántico que da el valor de su momento angular (que es una magnitud vectorial) medido a lo largo de una dirección determinada por la particular simetría de su ambiente. Por ejemplo, la dirección de tal simetría está dada, para partículas susceptibles a fuerzas magnéticas, por la dirección de un campo magnético. Si se hace variar lentamente la dirección de simetría, el teorema adiabático nos asegura que el espín de la partícula girará con la dirección de simetría, preservando la componente del momento angular de la partícula a lo largo de la dirección de simetría, y, por consiguiente, su número cuántico de espín.

Una dirección de simetría puede representarse por medio de un vector de longitud unidad y origen fijo. Dado que una dirección de simetría es una dirección arbitraria, los extremos de todos los posibles vectores de dirección de simetría yacen en una esfera de radio unidad cuyo centro es el origen de los vectores. La superficie de esta esfera unidad representa el espacio de parámetros para los espines girados, dado que la dirección de simetría determina el ambiente en el cual se mide el espín de una partícula. Cualquier serie de cambios en la dirección de simetría puede, en consecuencia, reflejarse gráficamente mediante una curva trazada sobre la superficie de la esfera. Si la curva es cerrada, ello significa, evidentemente, que los cambios son cíclicos. Demostré, valiéndome de teoría cuántica, que, al describir una tal curva, la partícula adquiere una fase geométrica dada por el producto de su número cuántico de espín y el ángulo só-

lido encerrado por la curva en la esfera del espacio de parámetros.

¿Cómo medir la fase geométrica de partículas submicroscópicas giradas? A pesar de su naturaleza fundamental, no es posible detectar directamente la fase de una onda cuántica; tan sólo resulta medible cuando se hacen incidir una sobre otra dos o más ondas cuánticas para producir las llamadas pautas de interferencia. Al sumar dos ondas, la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de las ondas componentes cuando la cresta de una de las ondas coincide con una cresta de la otra, y un valle de una con un seno de la otra. Pero cuando las crestas coinciden con senos, la amplitud de la onda resultante es la diferencia de las amplitudes de las dos ondas componentes. Por tanto, el patrón de amplitudes de la onda resultante –la configuración de interferencia– revela las fases relativas de las ondas componentes. (La diferencia de fases de dos ondas es la fracción de ciclo a través del cual debe evolucionar una de las ondas para que sus crestas y senos coincidan con los de la otra. Las fracciones de ciclo suelen expresarse en unidades angulares, como los grados o los radianes; un ciclo completo equivale a 360 grados, o lo que es igual, a 2π radianes.)

Claro está que para poder medir la fase geométrica de la función de onda de una partícula girada, primero será preciso "sumar" la partícula a una segunda, al objeto de producir pautas de interferencia mensurables. En teoría, ello podría lograrse escindiendo en dos un haz de partículas que estuvieran todas en el mismo estado de espín, haciendo girar los espines de uno de los haces escindidos y recombinando después los haces. Aunque a veces se realizan experimentos de este tipo, no suelen resultar tarea fácil.

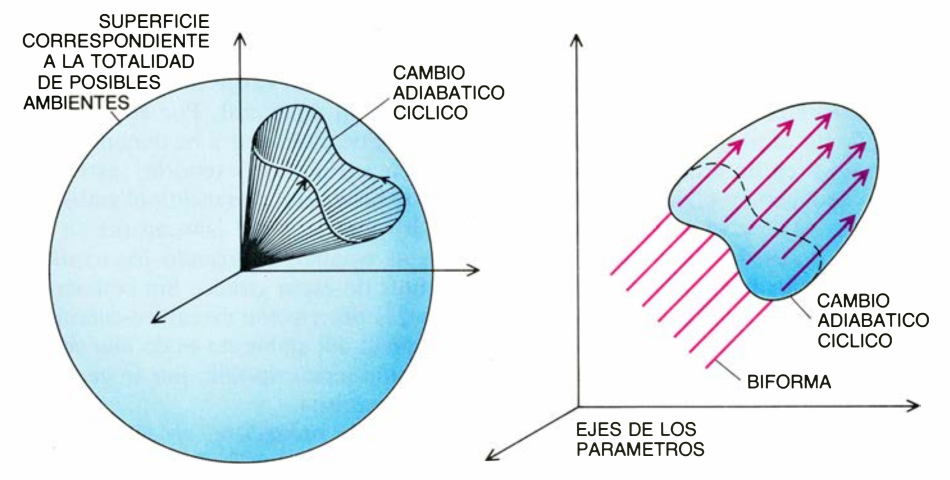
Más corrientemente, el haz inicial está formado por partículas en superposición de diferentes estados estacionarios de espín, caracterizado cada uno por un número cuántico de espín diferente. Los estados superpuestos se combinan unos con otros de una forma que depende de las fases relativas de sus respectivas funciones de onda. Dado que la fase geométrica de las funciones de onda depende de sus respectivos números cuánticos de estado de espín, las fases de las funciones de onda componentes sufren corrimientos distintos al girarse el espín de las partículas, cambiando la forma en que se combinan los estados para crear el estado superpuesto. Por lo general, tales cambios de forma del estado superpuesto resultan más fácilmente detectables que los cambios en el patrón de interferencia generado por combinación de haces de partículas monoestado, giradas y sin girar.

La fórmula del ángulo sólido correspondiente a la fase geométrica de los espines girados ha sido confirmada para varios tipos de diferentes partículas. T. Bitter, de la Universidad de Heidelberg, y D. Dubbers, del Instituto Laue-Langevin, en Grenoble, trabajaron con neutrones, cuyas direcciones de espín y de momento magnético coinciden. El momento magnético del neutrón permite hacer girar su espín alterando la dirección del campo magnético, dado que las líneas de fuerza del campo proporcionan la dirección de simetría. En su experimento, Bitter y Dubbers cambiaron cíclicamente la dirección de simetría haciendo pasar un haz de neutrones a través de un campo magnético helicoidal producido por una bobina retorcida atravesada por una corriente eléctrica. El ángulo sólido subtendido por la curva cerrada en el correspondiente espacio de parámetros podía ser fácilmente modificado alterando la intensidad de otro campo magnético a lo largo del eje del haz.

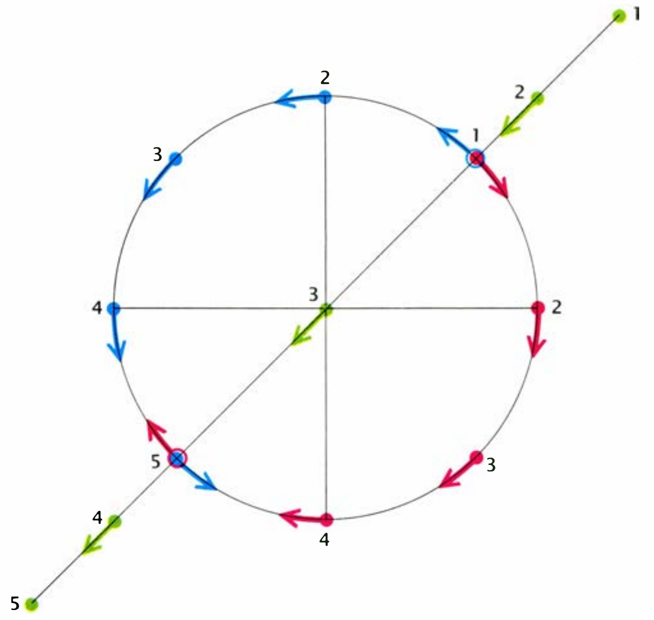
Aunque también los fotones tienen espín, no poseen momento magnético que permita hacer girar dicho espín. A pesar de ello, Raymond Y. Chiao, de la Universidad de California en Berkeley, Yong-shi Wu, de la Universidad de Utah, y Akira Tomita, de los laboratorios AT&T Bell, diseñaron y llevaron a cabo un experimento en el cual hicieron girar el espín de fotones. Se fundaron en el hecho de que el vector de espín fotónico apunta en la dirección en que viaja el fotón, y en que su sentido es el de avance o el opuesto. Por tanto, se puede desviar el espín de un fotón sin más que cambiar la dirección de su movimiento. Confinando un haz de luz láser en una fibra óptica arrollada, Chiao y sus colegas pudieron hacer girar el espín de los fotones; imponiendo que los dos extremos de la fibra fuesen paralelos, los investigadores dieron al proceso carácter cíclico.

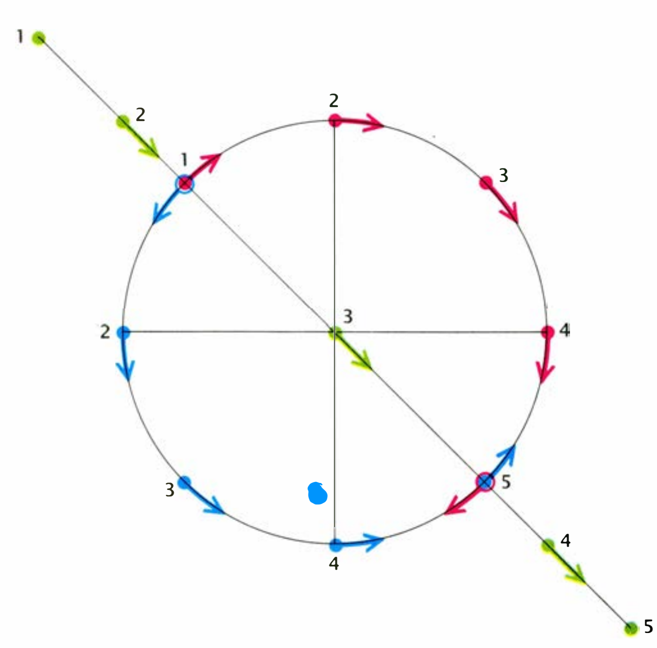
Aprovecharon también el hecho de que la luz linealmente polarizada (luz cuyo campo eléctrico asociado vibra en una única dirección) consta de fotones en los cuales los dos posibles estados del espín se hallan superpuestos. La dirección de la polarización está dada por las fases relativas de los dos estados del espín [*véase la figura 4*]. En consecuencia, cualquier cambio que pueda surgir en las fases relativas al adquirir los dos diferentes estados de espín distintas fases geométricas es directamente observable como rotación de la dirección de polarización de la luz. (Tal rotación fue observada por vez primera, en 1984, por J. Neil Ross, del laboratorio Central Electricity Generating Board, en Leatherhead, Inglaterra, pero este investigador no lo atribuyó a la fase geométrica.)

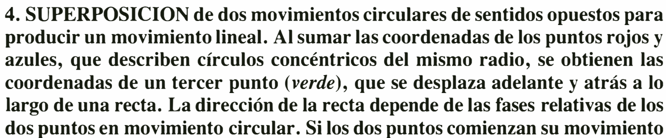
La rotación que Chiao y sus colegas observaron admite una explicación igualmente buena en términos clásicos. Puede entenderse como resultado de un transporte paralelo del vector de campo eléctrico a lo largo de la espira de fibra óptica. Así pues, para la luz



3. FASE GEOMETRICA de un sistema cuántico cuyo ambiente ha experimentado un cambio adiabático cíclico; puede inferirse de la representación gráfica de todos los posibles ambientes del sistema en un sistema de referencia cuyos ejes son parámetros, es decir, variables físicas que describen el ambiente. Un cambio adiabático cíclico queda entonces representado por una curva cerrada en el "espacio de parámetros". En el caso más sencillo, la fase geométrica viene dada en función del área de cualquier superficie que la curva encierre. Si la superficie es esférica (*izquierda*), tal área equivale al ángulo sólido subtendido por la curva. La fase geométrica puede generalizarse para espacios paramétricos con más de tres dimensiones, si se expresa en función de una magnitud matemática llamada biforma (*derecha*). Se puede imaginar que la biforma representa el flujo de una magnitud a través del espacio. La fase geométrica se calcula por integración de la biforma sobre cualquier superficie que "atrape" el flujo de la biforma que atraviesa el circuito.







4. SUPERPOSICION de dos movimientos circulares de sentidos opuestos para producir un movimiento lineal. Al sumar las coordenadas de los puntos rojos y azules, que describen círculos concéntricos del mismo radio, se obtienen las coordenadas de un tercer punto (*verde*), que se desplaza adelante y atrás a lo largo de una recta. La dirección de la recta depende de las fases relativas de los dos puntos en movimiento circular. Si los dos puntos comienzan su movimiento en el cuadrante superior del sistema de coordenadas (*izquierda*), la recta se encontrará inclinada un ángulo de 45 grados. En cambio, si comienzan en el cuadrante superior izquierdo (*derecha*), el ángulo será de 135 grados. Un principio similar explica la forma en que dos estados superpuestos de luz circularmente polarizada con sentidos de rotación opuestos crean luz linealmente polarizada. Las fases relativas de los estados determinan la dirección de polarización.

que recorre una fibra arrollada, la anholonomía de fase cuántica es equivalente a la anholonomía clásica de la polarización por transporte paralelo, o como Chiao y Wu lo expresan: "Preferiríamos considerar estos efectos como rasgos topológicos... que se originan en el nivel cuántico... pero sobreviven hasta el nivel clásico." En este caso, lo han señalado otros investigadores, el resultado sobre el ángulo sólido puede inferirse también de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo clásico, sin recurrir a la mecánica cuántica.

El trabajo de Robert Tycko, de los laboratorios Bell, nos proporciona un último ejemplo de giro de los espines. Tycko excitó los núcleos de cloro contenidos en un cristal de clorato sódico y provocó en ellos una superposición de estados exponiéndolos a un pulso de ondas de radio. Dado que los espines de los núcleos están alineados con el eje de simetría del cristal, pudo provocar la rotación de los espines de los núcleos excitados haciendo girar el cristal en torno a un eje distinto de su eje de simetría. Consiguientemente, la diferencia de fase entre los estados componentes de los espines de los núcleos aumentó de acuerdo con la fórmula del ángulo sólido. El efecto de repetidas rotaciones fue aumentar continuamente la diferencia de fase, que Tycko detectó como escisión de la frecuencia de una respuesta de una señal de radio emitida luego por los núcleos.

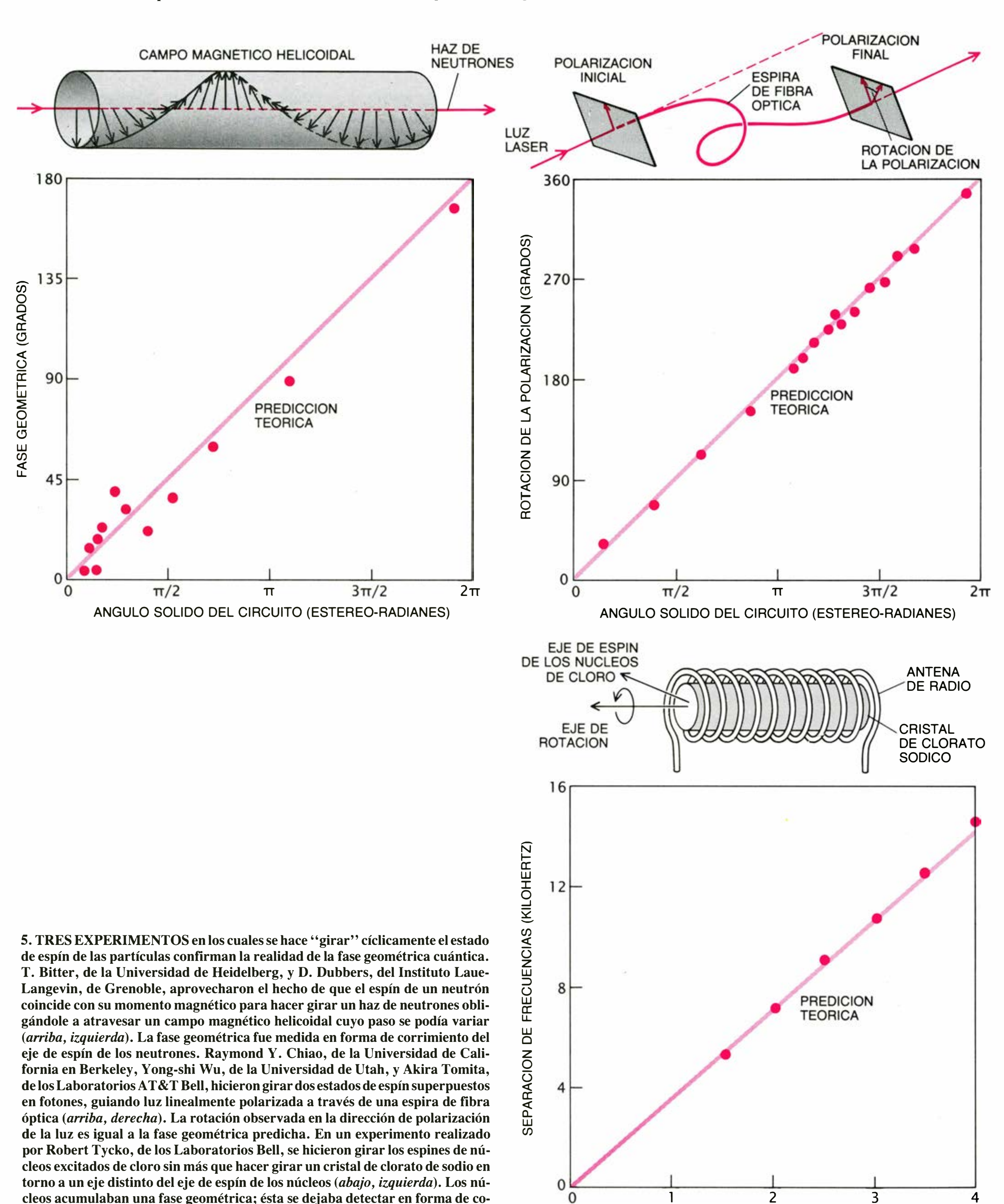
En todos los experimentos de espín girado que he mencionado se ha dado por supuesto que los parámetros ambientales que gobiernan un sistema pueden ser determinados (en principio, cuando menos) con un grado de precisión arbitrario, y que el ambiente no es afectado por ninguno de los cambios de fase que induce en el sistema. En realidad, ni una ni otra suposición están justificadas. La primera es inválida, porque los parámetros, que son variables físicas, se hallan sometidos también a las leyes de la mecánica cuántica, que estipulan una intrínseca incertidumbre en su medición. La segunda suposición es igualmente inválida, porque en física no existe nada semejante a la acción unilateral. Por estas razones, lo que hasta ahora he denominado "sistema cuántico" tendría, estrictamente hablando, que incluir el ambiente: los aparatos del laboratorio en el que se estaban realizando los experimentos de espín girado. Sin embargo, como la descripción mecánico-cuántica completa del ambiente es de una complicación indescriptible, por lo general se la desprecia.

Sí puede predecirse, en cambio, un curioso efecto que la fase geométrica de un sistema cuántico tendrá sobre la función de onda de su ambiente. Se da la circunstancia de que la función de onda de cualquier estado del sistema "total" (el producto de las funciones de onda asociadas al sistema cuántico y a su ambiente) tiene que ser una función unívoca: ha de poseer un solo valor, incluida la fase, para cada conjunto dado de parámetros. Lo cual sólo es matemáticamente posible si durante cualquier circuito del sistema cuántico en el espacio de parámetros la función de onda del ambiente adquiere un corrimiento de fase igual al del sistema, pero de signo opuesto.

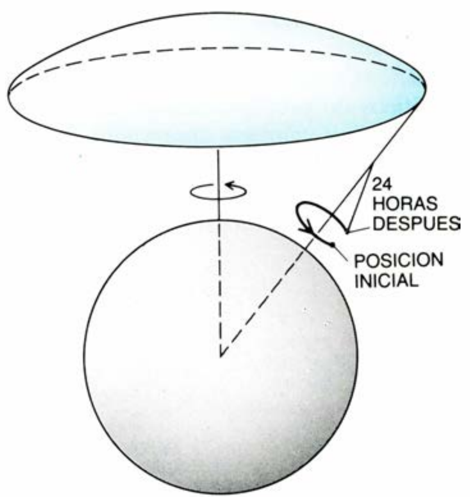
Se podría pensar que este corrimiento de fase, de la misma amplitud y signo contrario, constituye un artefacto matemático provocado por la separación de sistema cuántico y ambiente, pero la verdad es que puede suscitar fenómenos físicos observables. Se presentan tales efectos, por ejemplo, en ciertas moléculas, donde los electrones constituyen el sistema cuántico y, los núcleos, el ambiente. En 1979, C. Alden Mead y Donald G. Truhlar, de la Universidad de Minnesota (que establecieron los fundamentos de gran parte de los trabajos posteriores sobre la fase geométrica), señalaron que los cambios en la función de onda asociada a los electrones (el sistema) deberían afectar a la función de onda que describe el movimiento de los núcleos (el ambiente), alterando en consecuencia las energías correspondientes a las vibraciones y rotaciones de las moléculas. Tales cambios se reflejan en la energía de los fotones emitidos o absorbidos por las moléculas y son detectables por técnicas de espectroscopía.

Un experimento realizado por Guy Delacrétaz y Ludger Wöste, del Instituto Tecnológico Federal Suizo, Ed-

ward R. Grant y Josef W. Zwanziger, de la Universidad Cornell, y Robert L. Whetten, de la Universidad de California en Los Angeles, permitió detectar tales cambios espectroscópicos en una molécula compuesta por tres átomos de sodio. Los núcleos de sodio de la molécula experimentan un movimiento cíclico (llamado pseudorrotación) que provoca que el estado de mínima energía de los electrones adquiera una llamativa fase geométrica de 180 grados: en su función de onda, las crestas se convierten en senos, y viceversa. Los investigadores mencionados descubrieron que la fase geométrica de la función de onda de los electrones afecta, a su vez, a la función de onda de los núcleos, cambiando los niveles energéticos de pseudorrotación de los núcleos. Los cambios observados fueron coherentes con las predicciones de un análisis mecánico-cuántico generalizado de la fase geométrica.



5. TRES EXPERIMENTOS en los cuales se hace "girar" cíclicamente el estado de espín de las partículas confirman la realidad de la fase geométrica cuántica. T. Bitter, de la Universidad de Heidelberg, y D. Dubbers, del Instituto Laue-Langevin, de Grenoble, aprovecharon el hecho de que el espín de un neutrón coincide con su momento magnético para hacer girar un haz de neutrones obligándole a atravesar un campo magnético helicoidal cuyo paso se podía variar (*arriba, izquierda*). La fase geométrica fue medida en forma de corrimiento del eje de espín de los neutrones. Raymond Y. Chiao, de la Universidad de California en Berkeley, Yong-shi Wu, de la Universidad de Utah, y Akira Tomita, de los Laboratorios AT&T Bell, hicieron girar dos estados de espín superpuestos en fotones, guiando luz linealmente polarizada a través de una espira de fibra óptica (*arriba, derecha*). La rotación observada en la dirección de polarización de la luz es igual a la fase geométrica predicha. En un experimento realizado por Robert Tycko, de los Laboratorios Bell, se hicieron girar los espines de núcleos excitados de cloro sin más que hacer girar un cristal de clorato de sodio en torno a un eje distinto del eje de espín de los núcleos (*abajo, izquierda*). Los núcleos acumulaban una fase geométrica; ésta se dejaba detectar en forma de corrimiento de la frecuencia de las señales de radio emitidas por ellos mismos.



6. DESFASAJE ANGULAR de la posición de la masa oscilante de un péndulo en la Tierra. Constituye un ejemplo de fase geométrica en física clásica, descrito por John H. Hannay, de la Universidad de Bristol. Se podría pensar que el plomo de un péndulo que oscilase circularmente a razón de una revolución por segundo volvería, al cabo de 24 horas, exactamente a la misma posición del espacio desde la que se le puso en movimiento. En realidad, la posición del peso quedaría desfasada con relación a su posición inicial según un ángulo (*en color rojo*) denominado ángulo de Hannay, igual al ángulo sólido subtendido por el eje de revolución del péndulo (*en color azul*). El físico francés J. B. L. Foucault utilizó un péndulo similar para demostrar convincentemente la rotación de la Tierra. Sin embargo, el péndulo de Foucault describía un vaivén en un plano, y no un círculo, y la fase geométrica se manifestó en forma de rotación del plano de oscilación del péndulo.

La fase geométrica de un sistema sometido a un cambio adiabático cíclico puede expresarse con máxima elegancia dándola en función de una magnitud matemática llamada biforma, que representa el flujo de una magnitud a través de una unidad de superficie. La fase geométrica se calcula entonces por integración –una forma de suma generalizada– de la biforma sobre cualquier superficie que se extienda sobre el circuito descrito por el sistema en el espacio de parámetros, esto es, sobre cualquier superficie que "atrape" todo el flujo de la biforma a través del circuito. Una formulación matemática tan potente conjura la idea de la biforma acechante en el espacio de parámetros, fantasmal y oculta hasta que un sistema cuántico que completa un ciclo en el espacio de parámetros la convierte en algo real. Un efecto predicho en 1959 por Yakir Aharonov, de la Universidad de Carolina del Sur, y David Bohm, de la Universidad de Londres (pero entonces ambos en la Universidad de Bristol), puede quedar explicado precisamente mediante dicha biforma de fase geométrica.

El efecto Aharonov-Bohm es un corrimiento en la fase de la función de onda de una partícula cargada que se produce al transportar la partícula en torno a líneas de fuerza aisladas de un campo magnético. Tal efecto fue confirmado experimentalmente en 1960 por Robert G. Chambers, de Bristol. En este caso, el espacio de parámetros a través del que se mueve la partícula no está definido mediante variables abstractas, como direcciones de simetría; la partícula describe ahora su circuito a través del espacio ordinario, descrito mediante las coordenadas habituales (que miden largo, ancho y alto). Análogamente, la biforma de fase no es sólo una construcción matemática conveniente: en este caso se trata del campo magnético multiplicado por la carga de la partícula y dividido por la así llamada constante de Planck ($6{,}626 \times 10^{-34}$ joule-segundo). Expresada de esta forma, la fase de la partícula que circula en torno al campo magnético depende del flujo del campo magnético, magnitud ésta que pertenece de lleno al mundo de la física clásica.

Sin embargo, lo que ya no cae de lleno en la física clásica es el hecho de que la fase de la partícula cargada sea afectada por el campo magnético, a pesar de que la partícula jamás atraviesa una línea de fuerza. En la física clásica, las partículas sólo experimentan fuerzas cuando entran en contacto con campos eléctricos o magnéticos. Sin embargo, en el experimento de Aharonov-Bohm, ¡una partícula cargada resulta afectada por un campo magnético a pesar incluso de que se la mantenga separada del campo! Los físicos dicen que el campo parece influir no localmente en la partícula cargada. A diferencia de la rotación del plano de polarización en el experimento de Chiao y sus colegas, el efecto Aharonov-Bohm no resulta explicable por medio de la física clásica.

Aunque las biformas de fase geométrica se prestan a la descripción de fenómenos mecánico-cuánticos ajenos a nuestra experiencia cotidiana, también resulta posible generalizarlas para describir incluso la muy familiar mecánica de muelles y péndulos. John H. Hannay, de Bristol, ha desarrollado el equivalente clásico de la fase geométrica cuántico-mecánica. Hannay comenzó considerando sistemas macroscópicos de cuerpos oscilantes cuya configuración en cada momento está dada por una o más variables angulares. El ambiente de las oscilaciones se hace variar lentamente, pero el proceso da comienzo y fin en el mismo conjunto de parámetros. Después del ciclo las oscilaciones tienen la misma amplitud que inicialmente, pero los ángulos han cambiado.

Hannay se dio cuenta de que los corrimientos angulares pueden dividirse en parte geométrica y parte dinámica, exactamente igual que puede serlo el corrimiento de fase de un sistema mecánico-cuántico. La parte dinámica es la que se calcularía partiendo de la hipótesis de que el ángulo aumenta al ritmo marcado por la frecuencia instantánea de oscilación. El logro de Hannay consistió en identificar la contribución geométrica, hoy denominada ángulo de Hannay, y deducir una fórmula merced a la cual resulta posible calcularla como flujo de una biforma a través de un circuito cerrado de un espacio de parámetros. (Sin embargo, la analogía con la mecánica cuántica no es completa, porque es frecuente que los movimientos estudiados en la física clásica no sean oscilatorios, sino caóticos. En los sistemas caóticos no es posible definir variables angulares y no hay ángulo de Hannay.)

En uno de los ejemplos de Hannay se supone que una cuenta de collar se desliza a velocidad constante y sin fricción sobre un bucle no circular de alambre, al tiempo que se hace girar una vez el alambre dentro de su propio plano. En este caso, la variable angular es la distancia recorrida en torno al bucle, medida desde un punto dado del bucle. El ángulo de Hannay da la posición de la cuenta tras la rotación del bucle, en relación con la posición que ocuparía la cuenta si el bucle se hubiera mantenido estacionario. El ángulo es una pura combinación geométrica del perímetro del bucle y del área que abarca; alcanza un valor grande en el caso de un bucle largo y estrecho, y se anula si el bucle es circular.

Otro de los ejemplos de Hannay da el análogo clásico de la fase geométrica cuántica para espines lentamente girados. Fijémonos, por ejemplo, en el peso de un péndulo que se mueva en círculo. La gravedad determina en este caso la dirección de simetría, a saber, una recta vertical que pasa a través del centro de la Tierra. A causa de la rotación del globo, la dirección de simetría va también girando en el espacio (a menos que el experimento se realice en uno de los polos), por lo que al cabo de un día la posición del péndulo dentro de su órbita circular habrá experimentado un desfase, se habrá corrido un ángulo –el ángulo de Hannay– igual al ángulo sólido subtendido por la dirección de simetría.

Tal corrimiento en la posición del

peso del péndulo resulta aún más llamativa si el plomo se desplaza en vaivén en lugar de hacerlo en círculo. El movimiento de vaivén puede considerarse entonces una superposición o composición de dos movimientos circulares de direcciones opuestas (exactamente igual que la luz linealmente polarizada puede considerarse la superposición de dos estados de luz circularmente polarizada). Al cabo de un día de vaivén, los dos movimientos circulares habrán adquirido corrimientos angulares de signos opuestos, que se manifiestan en una rotación del plano de oscilación del péndulo.

Lo que acabo de describir es el péndulo con el cual el físico francés Jean B. L. Foucault demostró, en 1851, la rotación de la Tierra. El conocido fenómeno de rotación del plano de oscilación de un péndulo, tan frecuentemente exhibido en muchísimos museos de ciencias de todo el mundo, es, por consiguiente, un caso particular del ángulo de Hannay, el cual, a su vez, es el análogo clásico de la fase geométrica. Podemos explicarlo también como resultado de transporte paralelo, en este caso, del plano de oscilación del péndulo a causa de la rotación de la Tierra.

Volviendo al transporte paralelo, con el que comenzó este artículo, se podría decir que yo he completado un ciclo. Y, sin embargo, lo mismo que la fase de un sistema que está experimentando un ciclo adiabático, el final difiere del principio. El transporte paralelo que sirvió inicialmente de ilustración de un concepto abstracto aparece ahora en sistemas tangibles, cuyo comportamiento está gobernado por las leyes de la física para cambios ambientales lentos. La anholonomía geométrica se ha convertido en anholonomía dinámica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUANTAL PHASE FACTORS ACCOMPANYING ADIABATIC CHANGES, M. V. Beny en *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, vol. 992, n.° 1802, págs. 45-57; 8 de marzo de 1984.

ANGLE VARIABLE HOLONOMY IN THE ADIABATIC EXCURSION OF AN INTEGRABLE HAMILTONIAN. J. H. Hannay en *Journal of Physics A*, vol. 10, n.° 2, págs. 221-280; 1 de febrero de 1885.

BERRY'S PHASE-TOPOLOGICAL IDEAS FROM ATOMIC, MOLECULAR AND OPTICAL PHYSICS. R. Jackiw en *Comments on Atomic and Molecular Physics*, vol. 21, n.° 2, págs. 71-82; marzo de 1988.

GEOMETRIC PHASES IN PHYSICS. Editado por A. Bhapere y F. Wilczek, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., P. O. Box 128, Singapore 9128, en prensa

Plasticidad en el desarrollo cerebral

La articulación reticular definitiva del cerebro acontece después del nacimiento y depende de las primeras experiencias sufridas. La proteína MAP2 interviene en la bioquímica de la plasticidad cerebral

Chiye Aoki y Philip Siekevitz

Cualquiera que haya visto los esfuerzos de un bebé intentando alcanzar su juguete habrá advertido que la capacidad de un adulto para la percepción y el movimiento no es algo innato, sino que debe desarrollarse con el tiempo mediante el ejercicio. El programa genético desarrollado durante la gestación termina en un recién nacido con los órganos sensoriales sin estrenar y un cerebro bien formado, cuyos 100.000 millones de neuronas o células nerviosas se encuentran asociadas en vías que están especializadas en llevar a cabo funciones específicas. Pero antes de que el cerebro en desarrollo alcance su plena capacidad para procesar y analizar la experiencia sensorial, esta última debe dejar su huella sobre la estructura más fina del cerebro.

Aun cuando la organización fundamental del cerebro no cambia después del nacimiento, algunos detalles de su estructura y función sí conservan su plasticidad durante cierto tiempo, sobre todo en la corteza cerebral, la capa de tejido que forma la superficie cerebral convoluta. La experiencia sensorial de los órganos de la vista, olfato, gusto, oído y tacto activa, y refuerza con el tiempo, vías nerviosas específicas, a la vez que otras caen en desuso. La descompensación infantil en el uso de uno u otro ojo producirá deficiencias permanentes en la percepción visual del ojo subempleado. El cerebro en desarrollo puede compararse con una red viaria que evoluciona con el uso: las vías menos transitadas podrían abandonarse, ensancharse las más populares y abrirse otras nuevas si fuera necesario.

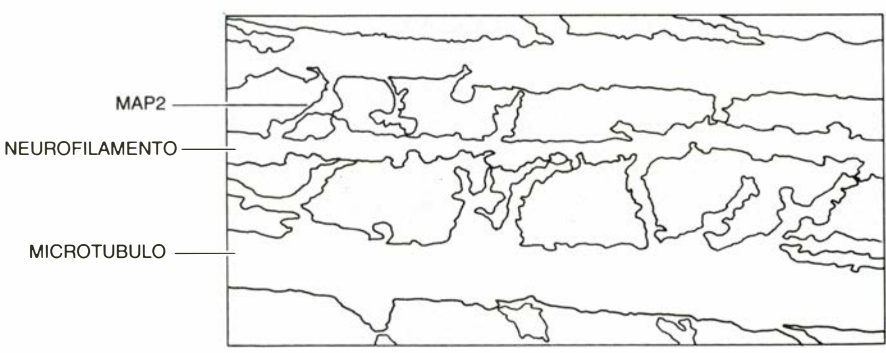
¿Cómo logra la experiencia moldear la organización cerebral? Hemos postulado una secuencia de acontecimientos moleculares, desencadenados por estímulos externos, que podrían contribuir a la plasticidad de una parte del cerebro del gato. Es probable que se sigan pautas similares, en el cerebro en desarrollo, durante las primeras sensaciones; y no sólo en los gatos, sino también en los seres humanos. Tales procesos moleculares podrían conformar muchos rasgos de la mente que compartimos los hombres. Al traducir las variaciones de las primeras sensaciones o experiencias en variaciones de la organización cerebral, los sucesos bioquímicos aludidos podrían explicar también algunas de nuestras diferencias individuales.

Porque no es difícil manipular la experiencia visual, nuestro estudio sobre la plasticidad del cerebro, lo mismo que otras investigaciones que nos precedieron, se ha centrado en el sistema óptico. Los estímulos visuales comienzan a procesarse en la retina del ojo, que aloja algunos centenares de millones de neuronas, densamente empaquetadas en una delgada capa. Un conjunto organizado de un millón de células ganglionares retinianas envían la señal emitida por la retina hacia el interior del cerebro. Sus axones, agavillados, forman el nervio óptico. Algunas de esas largas prolongaciones se proyectan en dos estructuras: los núcleos geniculados laterales (NGL), uno en cada hemisferio cerebral. Cada retina está conectada al núcleo geniculado lateral del lado cerebral opuesto (contralateral) y del mismo lado (ipsilateral). A su vez, las neuronas del NGL extienden sus axones hacia la parte posterior del cerebro, hacia la lámina IV, zona discreta que abarca la cuarta de las seis capas principales de la corteza visual primaria. Las neuronas de la lámina IV establecen contactos con otras capas de la corteza visual.

Las señales luminosas que llegan a la retina se convierten en señales electroquímicas que alcanzan las células ganglionares de la retina, que, a su vez, truecan las señales en potenciales de acción. Estos potenciales, o impulsos, se propagan a través de los axones y llegan a las neuronas de los NGL mediante las sinapsis. En cada sinapsis, el estímulo que llegue a un axón terminal desencadena la liberación de neurotransmisores, sustancias que cruzan la hendidura sináptica y se unen a receptores específicos del cuerpo celular o de las dendritas de la célula adyacente. (Se llaman dendritas ciertas prolongaciones receptoras que se ramifican.) En condiciones adecuadas, la unión del neurotransmisor mueve, a una neurona del NGL, a producir su propio potencial de acción; éste se propaga a lo largo del axón y alcanza las neuronas de la corteza visual primaria. El estímulo se analiza allí y en otras zonas de la corteza que reciben señales de la corteza visual primaria.

De estas conexiones, ¿cuántas están determinadas genéticamente y cuántas por las primeras sensaciones experimentadas? La investigación en ese dominio conoció un punto de inflexión a principios de la década de 1960 merced a los experimentos realizados por David H. Hubel y Torsten N. Wiesel, ambos entonces en la Facultad de Medicina de Harvard, quienes recibirían más tarde el premio Nobel [véase "Me-

CHIYE AOKI y PHILIP SIEKEVITZ son profesores de sendas universidades neoyorquinas. Aoki enseña en el departamento de neurología de la facultad de medicina de Cornell y Siekevitz profesa biología en la de Rockefeller. Aoki se doctoró en neurociencias por la Universidad Rockefeller en 1985. Siekevitz lo hizo en bioquímica por la de California en Berkeley, en 1949. Como el lector habrá adivinado, Aoki era alumno de Siekevitz en el momento en que se realizaban las investigaciones descritas en este artículo.

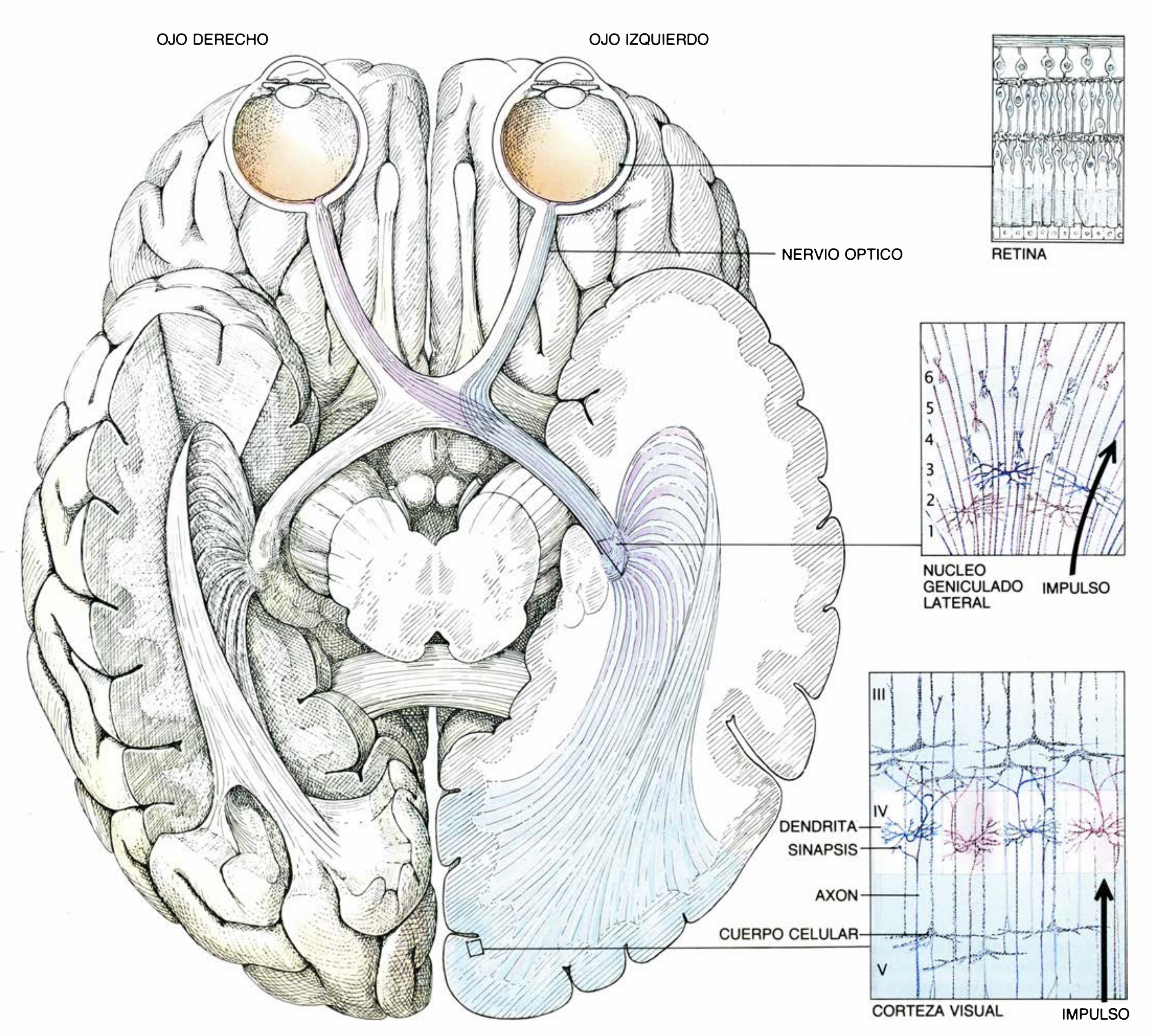


1. LAS MOLECULAS MAP2 tienden puentes entre neurofilamentos y microtúbulos en esta micrografía electrónica de una dendrita, porción receptora de una célula nerviosa. Neurofilamentos y microtúbulos forman parte del esqueleto interno que condiciona el crecimiento y estructura de la neurona; al controlar las interacciones entre sus proteínas constituyentes, las MAP2 pueden intervenir en el establecimiento de nuevas vías nerviosas. Esta imagen de una dendrita de la espina dorsal de rata fue tomada por el profesor Nobutaka Hirokawa y sus colegas, adscritos a la Universidad de Tokyo.

canismos cerebrales de la visión", por David H. Hubel y Torsten N. Wiesel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1979]. Hubel y Wiesel optaron por los gatos en el estudio del desarrollo del sistema visual; la razón era obvia: lo mismo que los humanos, los gatos tienen los ojos en la región frontal y así sus campos visuales se solapan bastante. Gracias a dicho solapamiento, los gatos poseen visión binocular en los 90 grados centrales de los 180 que abarca su campo visual. Hubel y Wiesel estudiaron las células binoculares, que respondían a la estimulación procedente de ambos ojos, en una parte de la corteza visual denominada zona 17. Las células binoculares revisten interés en la percepción de profundidad y constituyen alrededor del 40 por ciento de las neuronas de la zona 17 en los gatos (60 por ciento en los primates). Las demás neuronas, monoculares, responden a la estimulación procedente de un solo ojo.

Empleando sondas eléctricas capaces de detectar las señales generadas por las distintas neuronas, Hubel y Wiesel registraron sistemáticamente el número de neuronas de la zona 17 que respondían sólo a la estimulación del ojo ipsilateral, al ojo contralateral y a ambos ojos. Registraron también si las células binoculares mostraban preferencia por un ojo sobre el otro. ¿Qué descubrieron? En los gatitos que habían tenido un ojo cerrado por sutura durante los primeros meses de su vida, la proporción de neuronas de la zona 17 que respondían a la estimulación del ojo cerrado menguaba de forma drástica. En virtud de ello, las neuronas de la zona 17 que respondían al estímulo de la visión eran casi todas monoculares y permanecían así incluso después de que se permitiera que el animal usara de nuevo ambos ojos. Este sesgo importante en favor del ojo abierto —sesgo en la dominancia ocular— era permanente; el animal quedaba ciego de por vida en lo concerniente al ojo inutilizado.

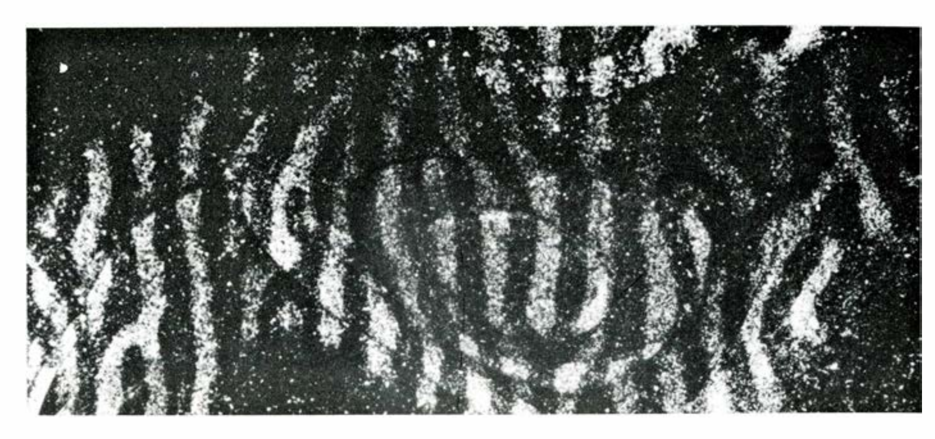
¿Qué parte del cerebro resultaba afectada por esa privación? Hubel y



2. RUTA DE LA VISION en el cerebro humano, esquematizado y visto de abajo arriba. Sólo se indica el camino para las señales que proceden de un lado del campo visual. La luz llega a la retina y se convierte en impulsos nerviosos que viajan hasta el núcleo geniculado lateral (NGL); aquí, las señales procedentes de cada ojo se segregan en seis capas. Las señales se transmiten hacia la lámina IV de la corteza visual primaria, donde persisten segregadas en bandas correspondientes a un ojo o al otro. Los impulsos viajan después a otras capas de la corteza visual, donde se integran las señales procedentes de ambos ojos. En el recuadro (*abajo*) aparecen marcadas las partes de una neurona; nos manifiesta tres de las seis capas de una fracción pequeña de la corteza visual. Las fibras de los axones trasladan la señal desde el cuerpo celular hasta el terminal presináptico, liberando neurotransmisores químicos que se unen a los receptores en la dendrita de la neurona postsináptica. Los NGL y las células corticales se hallan en realidad mucho más densamente empaquetadas que lo que se ilustra aquí.

Wiesel demostraron que, transcurrido cierto intervalo de privación monocular, las neuronas de la retina y del NGL continuaban respondiendo a la luz con normalidad. En otras palabras, la ruta óptica desde la retina hasta el NGL no venía condicionada por la experiencia sensorial sufrida y, por tanto, debía hallarse sometida a una extensa determinación genética. Este resultado significaba que los cambios que acompañaban a la privación monocular debían haber ocurrido en la organización de las neuronas corticales.

El efecto depende decisivamente del momento de la privación. Hubel y Wiesel descubrieron después que la privación monocular en el estado adulto no cambiaba la organización neuronal de la zona 17. Carl R. Olson y Ralph D. Freeman, de la Universidad de California en Berkeley, estudiaron de forma sistemática la repercusión de la edad del animal sobre el sesgo en la dominancia ocular tras intervalos de 10 días de privación monocular. Observaron lo siguiente: la privación monocular iniciada al mes de nacimiento provocaba un sesgo profundo en tanto que el efecto disminuía con la edad a la que ocurría la inutilización, y así hasta que el animal cumplía cuatro o cinco meses, cuando la privación monocular deja de repercutir en la zona 17. Hubel y Wiesel llamaron período crítico al intervalo comprendido entre el segundo y cuarto mes después del nacimiento; sólo durante ese período la corteza óptica goza de plasticidad suficiente para cambiar su organización en respuesta a señales de la retina.





3. ESTELAS DE DOMINANCIA OCULAR en tiras brillantes y oscuras, recogidas en estas autorradiografías de la lámina IV de una corteza visual de mono. Cada estela está definida por terminales axónicos de neuronas del NGL que reciben señales procedentes de un ojo solo. Las estelas brillantes aparecen tras inyectar en un ojo un marcador radiactivo que ha recorrido la trayectoria de la visión; las estelas correspondientes al otro ojo se hallan en oscuridad. En un animal que se ha criado en condiciones normales (*arriba*), las estelas que recibieron señales procedentes de un ojo mostraban la amplitud de las que recibieron señales procedentes del otro ojo. En un animal privado del uso de la visión de un ojo (*abajo*), las bandas del ojo activo (inyectado) se han dilatado, tapando casi por completo las bandas estrechas que representaban al ojo inutilizado.

En su empeño por detectar los cambios acontecidos en la estructura cortical culpables de dichos sesgos en la dominancia ocular, Hubel, Wiesel y Simon D. LeVay emplearon una técnica para marcar vías nerviosas con aminoácidos radiactivos. Anestesiaban monos y les inyectaban en un ojo aminoácidos radiactivos. Las células de la retina incorporaban esos aminoácidos en sus proteínas; éstas se transportaban a través de los axones y pasaban a las neuronas del NGL, que, a su vez, las enviaban a las neuronas de la lámina IV de la corteza visual. Las secciones corticales procedentes del mono inyectado se disponían sobre una película fotográfica, donde la radiactividad transportada a través de la ruta óptica creaba siluetas fantasmales de las zonas conectadas con el ojo inyectado.

Las partes radiactivas de la zona 17 de la lámina IV formaban diferentes bandas, que alternaban con otras no radiactivas. Cada parte constituía el objetivo de los axones procedentes de las neuronas del NGL que recibían señales de un solo ojo; las regiones adyacentes recibían señales del ojo contrario. En el mono normal, estas estelas de dominancia ocular presentaban la misma anchura: medio milímetro; en el mono con privación monocular las estelas que representaban al ojo activo eran notablemente más anchas y, reducidas, las que representaban el ojo privado. LeVay, Michael P. Stryker y Carla J. Shatz obtuvieron con gatos resultados similares.

Esos descubrimientos anatómicos, sumados a las pruebas electrofisiológicas, sugerían que, en los gatos con inutilización de un ojo, las sinapsis entre axones del NGL y las neuronas de la lámina IV favorecían una ruta óptica con función activa. El fenómeno recordaba el desarrollo de los músculos que se han ejercitado y la atrofia de los que han persistido en reposo. Pero aquí lo llamativo era el período crítico, el breve intervalo en el que ocurría el desarrollo condicionado por la actividad.

Los veinte años subsiguientes a los experimentos pioneros de Hubel y Wiesel han asistido a una investigación intensa de la plasticidad de la corteza visual, tanto electrofisiológica como neuroanatómicamente. En 1979, una nueva cuestión despertó nuestro interés: ¿qué mecanismos moleculares traducían la sensación óptica en redes nerviosas durante el período crítico?

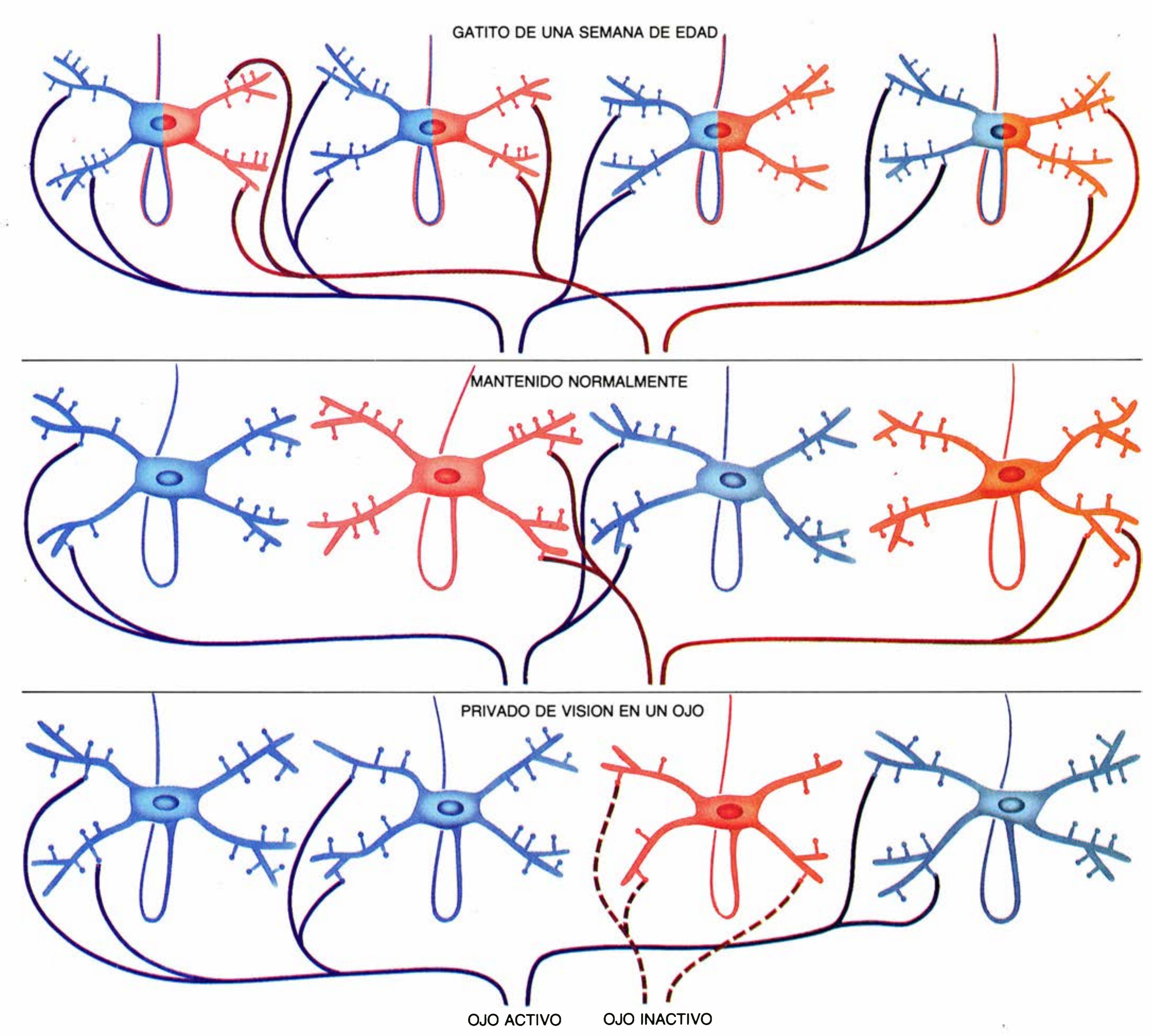
Empezamos investigando qué cambios bioquímicos señalaban el principio y el fin del período crítico. Necesitábamos, para ello, una estrategia que nos permitiera elegir los procesos bioquímicos implicados de forma específica en la plasticidad cortical y separarlos de los que acompañan al crecimiento y al mantenimiento. Encontramos aquí otro incentivo para estudiar el sistema visual del gato: podemos retrasar el inicio del período crítico enclaustran-

do los gatitos en total oscuridad, dejando que transcurran todos los demás cambios relacionados con el desarrollo. Ello nos permitía centrar la investigación en el período crítico para la dominancia ocular. Semejante enclaustramiento en oscuridad, como se llama esa estrategia, fue inicialmente explorada por Max S. Cynader, de la Universidad de Dalhousie en Nova Scotia. Cynader comenzó así sus estudios del sesgo en la dominancia ocular en gatos de dos años de edad como máximo, aun cuando el período crítico termina normalmente a la edad de cuatro o cinco meses.

Cynader descubrió que, en cuanto exponía a la luz los gatitos enclaustrados en oscuridad, empezaban los cambios en las conexiones corticales dependientes de la experiencia. Más aún, George D. Mower y sus colegas, del Hospital Pediátrico de Boston, observaron que, en los gatitos enclaustrados en oscuridad expuestos sólo unas horas a la luz, los cambios corticales activados por ésta proseguían a pesar de que se les llevara de nuevo a la oscuridad. El hallazgo hacía presumir la existencia de un acontecimiento bioquímico importante de la plasticidad, que permanecía inactivo hasta que la luz lo ponía en marcha.

Iniciamos la búsqueda de ese proceso instado por la luz. Comenzamos por estudiar el efecto ejercido por el adenosín monofosfato cíclico (AMP cíclico). Esta molécula de proporciones limitadas es un "segundo mensajero" celular clásico: transmite los mensajes recibidos en la superficie celular hacia centros específicos del interior. Había varias razones para nuestra elección. Se había encontrado que análogos estructurales del AMP cíclico estimulaban *in vitro* el desarrollo en neuronas de células precursoras de neuronas. Más concretamente, Takuji Kasamatsu y sus colegas, a la sazón en el Instituto de Tecnología de California, habían encontrado pruebas que corroboraban la hipótesis según la cual la norepinefrina, un neurotransmisor común, intervenía en la plasticidad cortical mediante la activación de la síntesis de AMP cíclico. La proposición de Kasamatsu nos indujo a examinar el papel del AMP cíclico con mayor detalle.

El AMP cíclico podría ejercer algún



4. REORGANIZACION DE LAS CONEXIONES NERVIOSAS durante el desarrollo. Provoca sesgos o desplazamientos de la dominancia ocular. Los dibujos representan las células de la lámina IV en contacto con los axones de neuronas del NGL. Los colores simbolizan los distintos caminos de las señales que se originan en uno y otro ojo. Muchas neuronas de un gatito de una semana de edad (*arriba*) reciben señales de ambos ojos. Durante el desarrollo normal (*en el centro*), los axones del NGL se segregan en estelas que sirven para un ojo o para otro. Ahora bien, si obstaculizamos un ojo (*abajo*), la mayoría de las células forman contactos con axones del núcleo geniculado lateral que llevan señales del ojo activo y empiezan a responder sólo ante el mismo. (Dibujos de George Kelvin.)

efecto a través de procesos bioquímicos harto conocidos. La unión de norepinefrina a un receptor de la superficie celular actúa de "primer mensajero"; éste, junto con la proteína G, activa la enzima adenilato ciclasa, que, a su vez, sintetiza AMP cíclico. El AMP cíclico se comporta más tarde como un segundo mensajero intracelular mediante la activación de otra enzima, la quinasa dependiente de AMP cíclico, que fosforila (agrega grupos fosfato) a ciertas proteínas de la célula. Aunque se ignora el efecto de la fosforilación en muchas de estas proteínas, se supone que la adición de grupos fosfato, cargados negativamente, a centros específicos de la molécula proteica podría modificar el tipo de plegamiento tridimensional de la proteína y alterar, por ende, su actividad biológica.

Decidimos buscar en el sistema visual de los gatos las proteínas fosforiladas por la quinasa dependiente de AMP cíclico. Para identificar las proteínas fosforiladas, homogenizamos células procedentes de la corteza visual de ejemplares en proceso de desarrollo e incubamos la preparación con adenosín trifosfato radiactivo (ATP), que servía de fuente de provisión de grupos fosfato. Toda proteína que se fosforilara durante la incubación portaría un grupo fosfato radiactivo. Cuando se separaran las proteínas por electroforesis en gel, el marcaje radiactivo denunciaría las proteínas fosforiladas en una película sensible a los rayos X.

Buscamos aquellas proteínas que adquirían mayor grado de fosforilación cuando se agregaba AMP cíclico a las células homogenizadas que si esto no ocurría. Varias proteínas quedaban fosforiladas por las quinasas que son activadas por AMP cíclico. Estaban, entre ellas, la sinapsina, proteína que sobreabunda en las sinapsis. Pero la descartamos como intermediario de la plasticidad cortical, ya que la fosforilación de la sinapsina resultaba igual para gatos enclaustrados a la luz o a la oscuridad. Un segundo candidato fue la propia quinasa dependiente de AMP cíclico. Esta enzima, comprobamos, se presentaba en idéntica cuantía al nacer que llegado el animal al estado adulto, sin que le afectara el enclaustramiento en oscuridad. Su fosforilación tampoco cambiaba durante el desarrollo.

Nuestras investigaciones se centraron en una tercera proteína fosforilada, de insólita magnitud por su peso de 300.000 dalton. Se trataba de la proteína 2 asociada a microtúbulos o MAP2, identificada mediante anticuerpos específicos contra dicha proteína que nos facilitaron Lester I. Binder, de la Universidad de Virginia, y Andrew Matus, del laboratorio Friedrich Miescher de Basilea. La concentración de esta proteína era la misma en cortezas de animales mantenidos en la luz o confinados en la oscuridad. Pero descubrimos que la fosforilación de la MAP2 difería antes y después del período crítico. En tejido extraído de corteza visual de gatos que habían superado el período crítico en un medio normal, la MAP2 resultaba fácilmente fosforilable *in vitro*; ello indicaba que muchos centros de la proteína permanecían sin fosforilar *in vivo*. Por contra, en la corteza visual de gatos mantenidos en oscuridad (en los que se había provocado el retraso del comienzo del período crítico) la MAP2 apenas si se fosforilaba, señal de que había quedado fosforilada *in vivo*.

¿Podía esa diferencia en la fosforilación guardar relación con la distinta plasticidad antes y después del período crítico? Para comprobar dicha posibilidad examinamos el tejido extraído de gatitos cuyo período crítico habíase, primero, retrasado por enclaustramiento en oscuridad y, luego, desencadenado por exposición a la luz durante unas horas. Descubrimos que esta MAP2 podía fosforilarse fácilmente *in vitro*, lo mismo que la MAP2 procedente de gatos que habían vivido en condiciones normales. Así, pues, parecía que la proteína permanecía enteramente fosforilada durante el enclaustramiento en la oscuridad, para desfosforilarse en cuanto la luz empezaba a estimular la ruta de la visión.

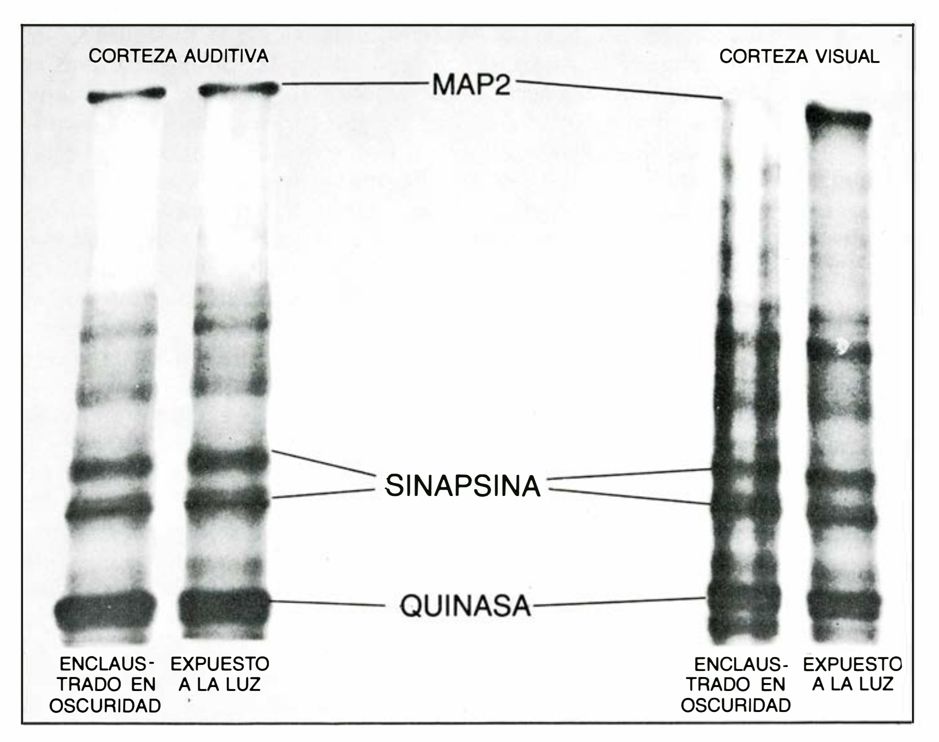
Ahora bien, antes de establecer una función para la fosforilación de la MAP2 en la plasticidad cortical había que descartar todavía la posibilidad de que estuviéramos observando sólo algún aspecto de una adaptación a la oscuridad, sin mayor relación con nuestro propósito. Por eso, estudiamos gatos adultos que habían crecido en situación de normalidad y confinados, más tarde, en oscuridad. Sabíamos que ese procedimiento no ejercía ningún efecto en la plasticidad cortical, pues su período crítico había terminado hacía tiempo. En estos gatos la fosforilación de la MAP2 no difería notablemente de la registrada en gatos adultos que vivían con una iluminación normal. Ni cambiaba cuando los gatos eran nuevamente expuestos a la luz.

Había que excluir, asimismo, la posibilidad de que la fosforilación de la MAP2 se debiera a un efecto general del mantenimiento en la oscuridad sobre el desarrollo, un retraso en el crecimiento cerebral, por ejemplo. Con ese propósito, examinamos la fosforilación de la proteína en la corteza auditiva, la parte del cerebro que procesa el sonido, de gatos confinados en la oscuridad. Esos gatos enclaustrados no estaban privados de estímulos sonoros; por consiguiente, la temporización del período crítico para la corteza auditiva permanecería inalterada y se haría patente cualquier efecto general que el enclaustramiento en oscuridad ejerciera sobre la fosforilación de la MAP2. Descubrimos que la fosforilacion de la MAP2 en la corteza auditiva no estaba condicionada por el enclaustramiento en la oscuridad, ni por la subsiguiente exposición a la luz.

¿Podía estar la fosforilación asociada a los cambios en la estimulación visual *per se* y no a la plasticidad? Para descartar la última objeción investigamos el comportamiento de la MAP2 en el NGL. Hubel y Wiesel habían demostrado que las células del NGL carecían de plasticidad después del nacimiento y continuaban respondiendo normalmente a la luz tras un período de privación monocular. No encontramos cambios en la fosforilación proteínica del NGL, ni antes ni después del período crítico. Este último resultado apoyaba nuestra conjetura según la cual la fosforilación de la MAP2 de la corteza visual no sólo estaba causada por la estimulación de la ruta óptica, sino que intervenía directamente en la plasticidad de la corteza visual.

La molécula de MAP2 es una de las proteínas del citoesqueleto, cuyo nombre deben a su supuesta función estructural en la célula, a la que conformarían lo mismo que el esqueleto da forma al cuerpo. Muchas proteínas de éstas se hallan también implicadas en el transporte de moléculas y orgánulos por el interior celular. Las proteínas asociadas a microtúbulos, o MAP, se encuentran juntas con otro componente principal del citoesqueleto: los microtúbulos; constan éstos de tubulina, una proteína.

La propia MAP2 se observa sólo en las neuronas; se halla asociada allí con los microtúbulos, la actina (que forma otro componente del citoesqueleto, los microfilamentos) y la proteína de los neurofilamentos (que forma los neurofilamentos, estructura del citoesqueleto exclusiva de las neuronas). La realidad es que la MAP2 se ha detectado en todos los tipos de neurona examinados hasta la fecha, lo que sugiere una presumible función en la plasticidad en todas las regiones cerebrales y durante toda la vida, y no sólo en la corteza visual durante el período crítico. (Resulta del



5. ES EVIDENTE LA DIFERENCIA BIOQUIMICA en las MAP2 de la corteza visual de un gato sometido a confinamiento en oscuridad durante 52 días y otro expuesto a la luz tras haber sufrido también el encierro en oscuridad. Las bandas oscuras de estas autorradiografías corresponden a las proteínas que han incorporado grupos fosfato radiactivo durante la fosforilación y se separaron luego, por electroforesis en gel, de acuerdo con su peso molecular. Las proteínas de las células corticales se incubaron con AMP cíclico y quinasa dependiente de AMP cíclico, junto con el marcador radiactivo. Dos proteínas —la sinapsina y la quinasa— se fosforilaron con idéntica intensidad en ambos gatos; no así la MAP2. En la corteza visual del gato enclaustrado en oscuridad, la MAP2 estaba quizás ya fosforilada y no incorporó el marcador radiactivo, mientras que, en el gato expuesto a la luz, la MAP2, desfosforilada, incorporó intensamente el marcador. La exposición a la luz no interviene en la fosforilación de la proteína asociada al microtúbulo en la corteza auditiva.

mayor interés advertir cómo un laberinto anormal de proteínas del citoesqueleto, entre las que aparece la MAP2, se deja ver en el cerebro de pacientes con la enfermedad de Alzheimer; su grado de presencia guarda correlación, así parece, con el grado de demencia.)

¿De qué manera influiría la MAP2 en la plasticidad cortical? En primer lugar, por ser proteína del citoesqueleto debe colaborar en la conformación de las neuronas, que está sometida a un control riguroso. La mayoría de las neuronas presentan una morfología característica de axones y dendritas. Hay indicios suficientes para sospechar que la MAP2 se halla implicada en la configuración particular de las dendritas. En este mismo orden, la microscopía electrónica muestra que los microtúbulos (que están asociados con la MAP2) se orientan a lo largo de las dendritas y ramificaciones de las mismas; para demostrar que la MAP2 se concentra en las dendritas Matus ha empleado una técnica de tinción con anticuerpos.

Más, Richard Bernhardt, trabajando en colaboración con Matus, observó que la MAP2 se acumulaba en las dendritas de formación reciente antes de que apareciera la tubulina, el componente más importante de los microtúbulos. Matus y Bernhardt han sugerido que la MAP2 inicia y controla el ensamblaje, en el interior dendrítico, de estructuras formadas por las MAP, tubulina, proteína de neurofilamento y actina. La MAP2 determinaría de ese modo la morfología de las dendritas, así como el tráfico intracelular de las moléculas entre las dendritas y el cuerpo celular.

La forma de las dendritas condiciona la función neuronal de múltiples maneras. Por ejemplo, cuanto más ramificadas y largas sean las dendritas de una neurona, mayor número de señales de otras neuronas puede recibir e integrar. Además, la ramificación dendrítica determina el grado de eficacia con que una neurona distribuye una señal. Cuando las dendritas de una neurona reciben señales excitadoras o inhibidoras de otras neuronas, las dendritas inician su propia señal, que llega al cuerpo celular. Si la señal que arriba al cuerpo celular posee suficiente intensidad, la célula genera un potencial de acción por sí sola. La morfología y el tamaño de una dendrita determinan cuán rápido y cuán lejos puede llegar la señal; condicionan, pues, la capacidad celular para responder ante las señales recibidas. Por ejemplo, una señal generada en una dendrita grande situada cerca del cuerpo celular tiene mayor posibilidad de desencadenar un potencial de acción que otra señal generada en una dendrita pequeña y alejada del cuerpo celular.

¿Cómo puede afectar la MAP2 a la estructura del citoesqueleto? Una pista sobre ese hecho, sugerido por Matus y Bernhardt, nos la puede ofrecer la tubulina; ésta requiere la presencia de MAP2 desfosforilada para polimerizar y asociarse en microtúbulos. Por regla general, la MAP2 desfosforilada promueve interacciones estables de la tubulina, actina y proteína de neurofilamento, mientras que la MAP2 fosforilada debilita esas proteínas del citoesqueleto. Así, cuando la MAP2 del interior de una neurona está desfosforilada, las dendritas podrían hallarse estáticas; cuando está fosforilada, las dendritas se tornarían dinámicas, dispuestas para cambiar de forma y longitud.

En nuestras investigaciones iniciales supusimos que la MAP2 de gatitos confinados en la oscuridad se hallaba fosforilada *in vivo*, para desfosforilarse cuando la luz desencadenaba los cambios sinápticos dependientes de las sensaciones sufridas. Sospechamos que mientras la MAP2 permaneciera fosforilada —el estado en que se encuentra cuando los gatitos viven en la oscuridad—, persistiría indeterminada la estructura del citoesqueleto de las neuronas corticales. La corteza estaba pronta para cambiar su organización en respuesta a la actividad neuronal evocada por la exposición a la luz. La pérdida subsecuente de plasticidad durante el período crítico podría deberse, en parte, a la progresiva desfosforilacion de la MAP2, que confiere una rigidez creciente al citoesqueleto de la neurona. Este proceso estabiliza la morfología de las neuronas, limitando las posibilidades de reorganización de las interconexiones neuronales en la corteza visual.

La hipótesis según la cual la arquitectura neuronal quedaría sin determinar hasta que acabara el período crítico ha recibido apoyo de los estudios sobre la corteza visual de monos y roedores enclaustrados en oscuridad. Esas neuronas presentan una llamativa pobreza de espinas dendríticas. Estas cortas prolongaciones, habituales en las superficies de las dendritas, son los sitios más importantes para el contacto sináptico entre neuronas. Con su pérdida se resiente la conexión entre neuronas. La MAP2 podría actuar sobre los micro-

túbulos para controlar la formación y alteración de espinas y dendritas.

A través de su intervención en el citoesqueleto, la MAP2 podría también influir en la plasticidad cortical controlando el transporte y el anclaje de las moléculas necesarias para la transmisión sináptica y el desarrollo. Moléculas que abarcarían receptores de hormonas, neurotransmisores, factores que estimulan el crecimiento y proteínas de membrana que modulan la excitabilidad neuronal.

Hemos identificado una molécula, la MAP2, cuyas características bioquímicas en la corteza visual cambian con el inicio del período crítico. Se trata de la primera de este tipo de proteínas, pero no la última. Habrá otras proteínas que nuestros métodos no son todavía capaces de detectar. Quizá la actividad biológica de muchas proteínas pueda alterarse al comienzo del período crítico por métodos distintos de la fosforilación. Y a pesar de la solidez de las pruebas en favor de la intervención de la MAP2, resulta aún prematuro asegurar que la desfosforilación de la MAP2 provoca un cambio real en la plasticidad y no se trata ella misma de un efecto del cambio. Creemos, sin embargo, que los cambios moleculares deben preceder a los cambios estructurales de las dendritas.

A pesar del desconocimiento de la función exacta que cumple la fosforilación de la MAP2, esta observación ha levantado nuevos interrogantes. ¿De qué manera puede la estimulación, por la luz, de la ruta óptica modificar el estado de la fosforilación de la MAP2 en la corteza visual? ¿Se debe dicho cambio a una variación en la concentración intracelular de AMP cíclico (que activa la quinasa que fosforila la MAP2)? En nuestra opinión, la exposición a la luz podría afectar el nivel de AMP cíclico al modificar la densidad de receptores de la norepinefrina, el neurotransmisor al que Kasamatsu hacía intervenir en la plasticidad cortical. (La unión de la norepinefrina al receptor activa la adenilato ciclasa, que cataliza la producción de AMP cíclico.)

Para comprobar esta hipótesis, identificamos los centros del receptor incubando secciones de corteza visual mediante una sonda radiactiva que se enlaza específicamente con los receptores. Nos encontramos con que la característica distribución en capas de los receptores de la norepinefrina no difería, que se viera, del cerebro de gatos normales al de gatos enclaustrados en oscuridad o gatos enclaustrados en oscuridad que habían sido expuestos a la luz. Nos enseñaba ese resultado que los cambios acontecidos en la fosforilación de la MAP2 no guardaban correlación con ningún cambio brusco en la ubicación y densidad de los mencionados receptores. Nuestra técnica, sin embargo, hubiera sido incapaz de detectar redistribución alguna de los receptores entre diferentes tipos celulares dentro de una misma capa. Debe procederse a un minucioso análisis microscópico antes de contestar esta cuestión.

Cabe otra posibilidad: la alteración de un sistema distinto (transmisor-receptor o receptor-hormona) tras la exposición del sistema visual a la luz. A este propósito, un interesante descubrimiento reciente de Mark F. Bear, de la Universidad Brown, y Wolfe Singer, del Instituto Max Plank de Investigación Cerebral de Frankfurt, señala que la plasticidad cortical se funda no sólo en la epinefrina, según pensaba Kasamatsu, sino también en la acción sinérgica de la norepinefrina y la acetilcolina; este segundo neurotransmisor abunda en la ruta de la visión. Se ha propuesto el concurso de un transmisor más, el glutamato.

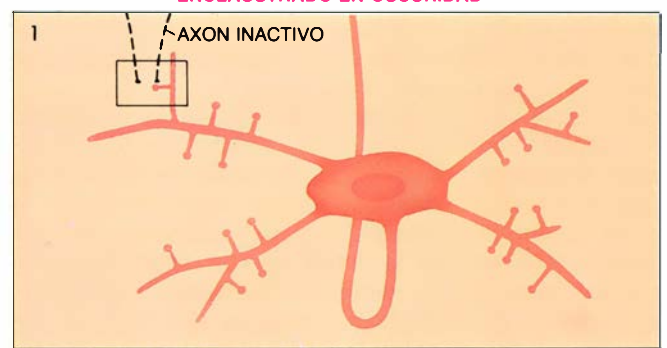
Estamos investigando la posibilidad de que ciertas señales visuales desencadenen la liberación de otras moléculas que activan, según se sabe ya, la adenilato ciclasa y estimulan, por tanto, la síntesis de AMP cíclico. Tratamos de averiguar si las señales visuales condicionan el nivel de AMP cíclico al modificar la actividad de la fosfodiesterasa del AMP cíclico, enzima que degrada dicha molécula. Una tercera posibilidad: que la señal visual condicione directamente la MAP2. Pudiera ocurrir, por ejemplo, que, durante el enclaustramiento en oscuridad, la MAP2 se alojara cerca de las quinasas dependientes de AMP cíclico, y permaneciera así en un estado fosforilado. Tras el estímulo, por la luz, del sistema visual, la MAP2 podría traslocarse hasta una zona distante de las quinasas. Por último, una cuarta posibilidad sería que la fosfata-



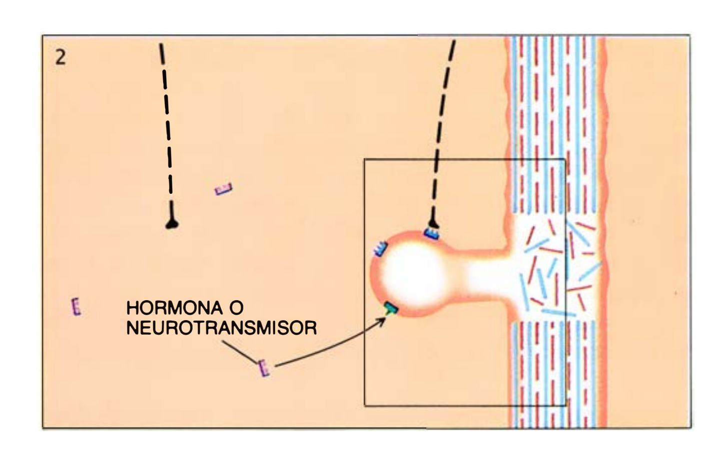
6. DISTRIBUCION DE LAS MAP2 en las células piramidales de la corteza visual de la rata. Esa distribución aparece representada por las zonas oscuras este corte, teñido por un indicador cromático que se acoplaba a un anticuerpo que se unía específicamente a la MAP2. La fuerte tinción revela que la MAP2 se concentra en las dendritas que salen del cuerpo celular, portador también de MAP2, salvo en sus núcleos sin teñir. La presencia de MAP2 en las dendritas sugiere que la proteína podría regular la forma de las dendritas. Las células piramidales constituyen un tipo común de neurona. (La fotografía ha sido tomada por Andrew Matus.)

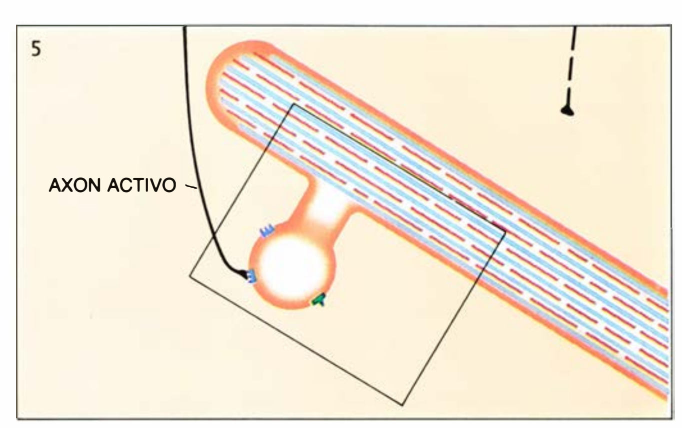
ENCLAUSTRADO EN OSCURIDAD

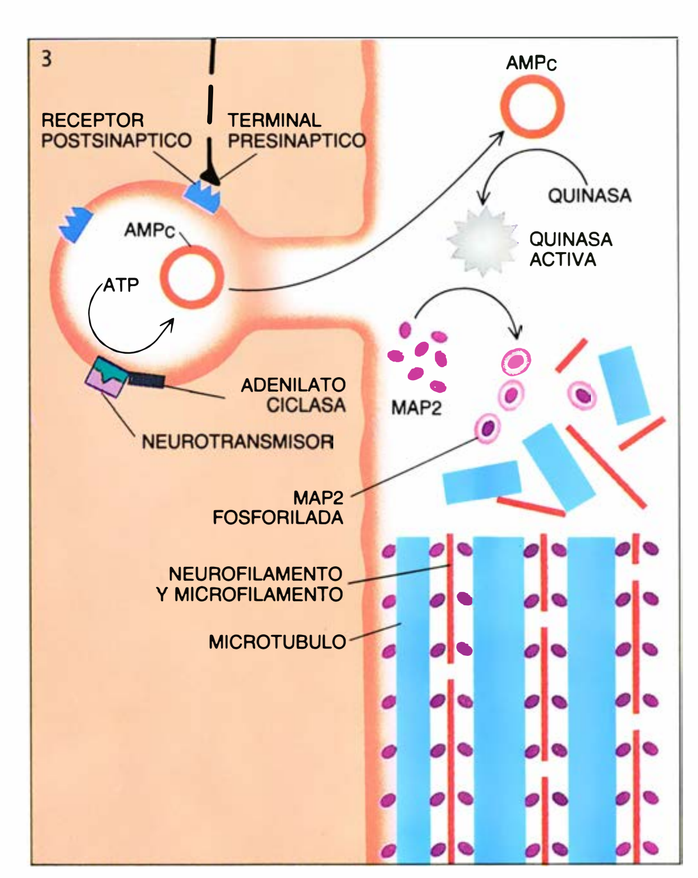
EXPUESTO A LA LUZ

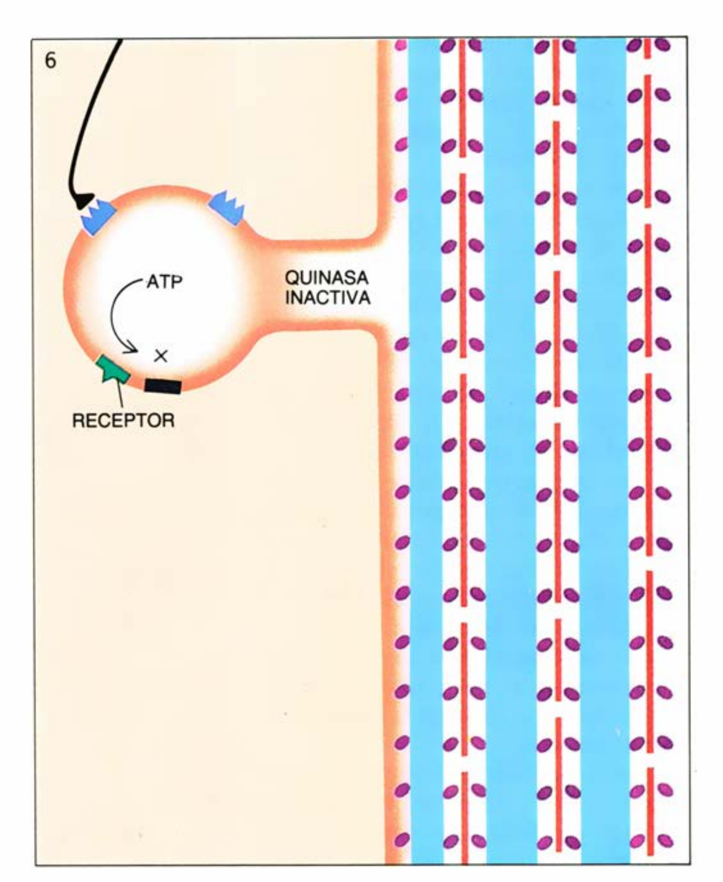












7. PAPEL REGULADOR DE LAS MAP2 en la reorganización de las dendritas. (El dibujo no está hecho a escala.) Una célula cortical (*1*) de un gatito enclaustrado en oscuridad se halla en contacto con un axón inactivo. Un neurotransmisor u hormona que interviene durante el enclaustramiento en oscuridad se une a los receptores de las ramificaciones dendríticas y desestabiliza las proteínas del citoesqueleto (*2*), desencadenando una cascada de acontecimientos moleculares (*3*). La unión del neurotransmisor o la hormona al receptor activa la adenilato ciclasa, enzima que convierte el adenosín trifosfato (ATP) en AMP cíclico. El AMP cíclico activa otra enzima, una quinasa que fosforila MAP2. La MAP2 fosforilada inhibe, a su vez, la formación de microtúbulos y bloquea también la interacción de microtúbulos con microfilamentos y neurofilamentos. Cuando se expone el gatito a la luz, la naturaleza plástica de la dendrita le permite moverse hacia un axón activo (*4*). Las proteínas de la dendrita podrían estabilizarse (*5*) cuando procesos desconocidos que ocurren durante la estimulación visual provocan que se desfosforile la MAP2 y forme puentes entrecruzados entre las proteínas del citoesqueleto (*6*). Nada impide que este proceso fuera reversible.

sa, se activara por estimulación visual; esa enzima desfosforila proteínas.

Para presumir de un conocimiento cabal de la función de la MAP2 en el período crítico conviene desentrañar antes la proteína en cuestión. Richard B. Vallee y William E. Theurkauf, de la Fundación Worcester para Biología Experimental en Shrewsbury, señalan que la molécula de MAP2 presenta 22 centros susceptibles de fosforilación, trece de los cuales dependen de la concentración de AMP cíclico. Quizá la función biológica de la MAP2 quede sutilmente alterada con la variación del número de centros fosforilados o con la combinación de los mismos. Las quinasas intracelulares dependientes de AMP cíclico continúan fosforilando la MAP2 en el estado adulto, lo que da a entender que la fosforilación y desfosforilación de la MAP2 desempeña otras misiones importantes, además de conferir plasticidad a la corteza durante el desarrollo.

Estamos empezando a conocer de qué modo la bioquímica molecular determina la estructura de las neuronas y de qué forma los cambios estructurales se traducen en cambios en la función cerebral. A medida que vayamos trabajando por dar respuesta a esas cuestiones, nos hallaremos más cerca de entender la manera en que el mundo exterior se va espejando en la microestructura cerebral. La solución nos permitirá apreciar la singularidad de cada individuo, formada por inexorables procesos genéticos y, también, producto único de su propia experiencia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VISUAL NEURAL DEVELOPMENT. J. Anthony Movshon y Richard C. Van Sluyters en *Annual Review of Psychology*, vol. 32, págs. 477-522; 1981.

MODIFICATION OF MICROTUBULE STEADY-STATE OF THE MICROTUBULE-ASSOCIATED PROTEINS. Larry Jameson y Michael Caplow en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 78, n.º 6, págs. 3413-3417; junio de 1981.

ONTOGENETIC CHANGES IN THE CYCLIC ADENOSINE 3′, 5′ -MONOPHOSPHATE-STIMULATABLE PHOSPHORYLATION OF CAT VISUAL CORTEX PROTEINS, PARTICULARLY OF MICROTUBULE-ASSOCIATED PROTEIN 2 (MAP2): EFFECTS OF NORMAL AND DARK READING AND OF THE EXPOSURE TO LIGHT. Chiye Aoki y Philip Siekevitz en *Journal of Neuroscience*, vol. 5, n.º 9, págs. 2465-2483; septiembre de 1985.

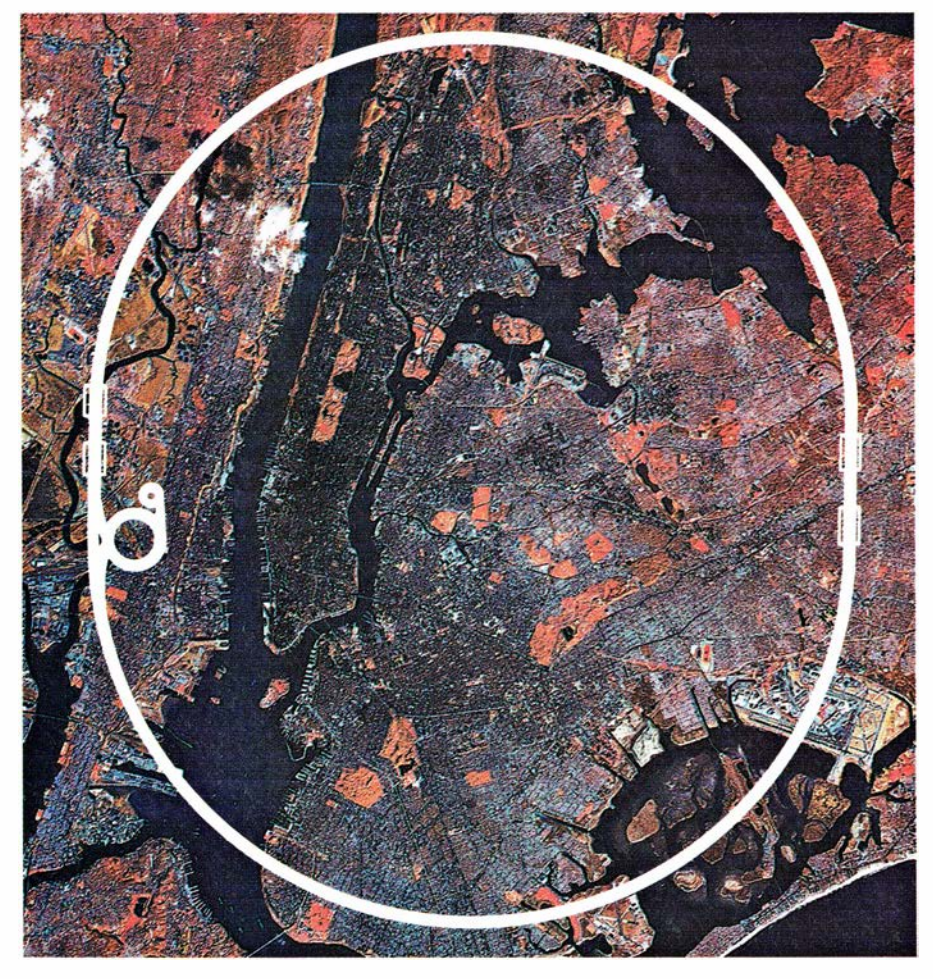
THE ROLE OF NOREPINEPHRINE IN PLASTICITY IN THE VISUAL CORTEX. B. Gordon, E. E. Allen y P. Q. Trombley en *Progress in Neurobiology*, vol. 30, n.º 2-3, págs. 171-191; 1988.

Ciencia y sociedad

Superacelerador superconductor

El Departamento de Energía de 9los EE.UU. ha anunciado su decisión de construir el superacelerador superconductor en el estado de Texas, tras estudiar las ofertas de los 25 estados que respondieron a la convocatoria formulada en abril de 1987. Hubo siete estados finalistas: Arizona, Colorado, Illinois, Michigan, Carolina del Norte, Tennessee y Texas. Pero la estrella de la suerte ha brillado sobre Texas. El interés de los distintos estados por conseguir que esta enorme máquina se construya en su territorio radica en los beneficios económicos que comportará su instalación. Las previsiones del Departamento de Energía cifran el coste de la construcción del acelerador en más de 5000 millones de dólares; una vez terminado, dará trabajo a 2500 personas entre científicos y técnicos, aparte de los 500 profesores visitantes que recibirá cada año. El presupuesto de funcionamiento probablemente alcanzará los 270 millones de dólares anuales. Ello no obstante, la victoria de Texas puede resultar pírrica.

El superacelerador parecía tener amplio apoyo hace dos años, cuando la administración Reagan concedió el visto bueno al proyecto. La máquina, diseñada como un inmenso anillo de unos 85 kilómetros de circunferencia, suficiente como para cercar la ciudad de Nueva York, acelerará y provocará el choque de protones entre sí a energías de 40 billones de electronvolt (TeV). Esto corresponde a más de 20 veces la energía a la que chocan las partículas impulsadas por el acelerador más potente en funcionamiento en la actualidad, el tevatrón del Laboratorio Nacional Enrico Fermi en Batavia, Illinois.



1. EL ACELERADOR que se espera construir en Waxahachie, Texas, precisará un túnel de 85 kilómetros de circunferencia (donde cabría Manhattan y aledaños de Nueva York). Por medio de unos 10.000 imanes superconductores acelerará los protones a velocidades cercanas a la de la luz, provocando colisiones entre ellos de una violencia tal que rivalizará con la de la gran explosión.

Se encuentran en fase de proyecto otras máquinas que está previsto que superen al tevatrón y que empezarán a operar a mediados de la próxima década. La Unión Soviética está construyendo un acelerador de protones de 3 TeV, y el CERN, el centro europeo de física de partículas en Suiza, está considerando la creación de uno propio, de 18 TeV. Es posible, sin embargo, que estos aceleradores no alcancen potencia suficiente para detectar el bosón de Higgs, auténtico reto que tiene ante sí la física de partículas. Su detección aportaría importantes pistas para comprender el origen de la masa y quizá permitiera formular una teoría unificada para todas las fuerzas de la naturaleza. En cualquier caso, los partidarios del superacelerador opinan que será el único capaz de deshacer la aporía: o detectará el bosón de Higgs o, por el contrario, probará su inexistencia, en cuyo caso dará origen también a nuevas teorías sobre la naturaleza íntima de la materia.

A medida que los beneficiarios potenciales del proyecto han ido disminuyendo, la oposición política ha ido aumentando, inevitablemente. El Departamento de Energía ha pedido un presupuesto de 363 millones de dólares para 1989 –unas diez veces superior al del año anterior– para empezar la construcción. El pasado verano, después de múltiples consultas, el Congreso aprobó una partida de 100 millones de dólares destinados a financiar la prosecución de los trabajos del proyecto y retrasó como mínimo un año el inicio de la fase de construcción. Este retraso va a permitir que la nueva administración reconsidere el proyecto. Sin embargo, a pesar de que se espera que el presidente Bush respalde el presupuesto del Departamento de Energía, el Congreso de los EE.UU. podría demorar de nuevo, o incluso dejar en suspenso el proyecto del superacelerador ante la influyente oposición a la máquina expresada por Arno A. Penzias, de los Laboratorios Bell de la AT&T, y Philip W. Anderson, de la Universidad de Princeton, entre otros. Argumentan éstos que la construcción del superacelerador dañará la física al desviar recursos económicos y humanos de

otros proyectos valiosos. Los críticos cuestionan incluso la pretensión de los físicos de partículas de ocupar el trono de la ciencia, señalando que no existe ninguna extrapolación de la física de partículas capaz de explicar el comportamiento de sistemas macroscópicos tales como una bacteria.

El Congreso tiene otras preocupaciones más prosaicas. Para acelerar y enfocar los protones en su vertiginoso recorrido por el túnel oval del acelerador, está previsto que la máquina utilice unos 10.000 potentes imanes superconductores. El coste de la construcción de cada uno se eleva, según el Departamento de Energía, a 100.000 dólares; algunos expertos sostienen que esa cifra subirá después de las pruebas y posteriores modificaciones de los primeros prototipos.

La barrera económica puede resultar infranqueable. El Congreso está decidido a reducir el déficit presupuestario, mientras el superacelerador se ve obligado a entrar en competencia con otros macroproyectos (la estación espacial y la lanzadera), que tienen un resultado final más tangible y que, además, no se concentran en un único estado y pueden generar, por tanto, un mayor apoyo político. Para reducir los costos del proyecto, la administración americana espera conseguir la participación de otros países, como Canadá, Gran Bretaña y Japón, aunque es poco probable que se comprometan en el proyecto antes de que haya una resolución firme estadounidense.

Los agujeros negros, ¿una máquina del tiempo?

La revista *Physical Review Letters* no es una publicación frívola, aunque un esporádico lector podría sospecharlo tras detenerse en el artículo reciente de Michael S. Morris, Kip S. Thorne y Ulvi Yurtsever, del Instituto Tecnológico de California (Caltech). Los autores proponen utilizar un agujero negro como máquina del tiempo.

La idea no es en absoluto nueva. Desde las primeras décadas de este siglo se sabe que un agujero negro es como el extremo de un "túnel de gusano" o túnel topológico que une dos regiones diferentes del espacio-tiempo. Desgraciadamente, estos túneles no son una vía de tránsito útil. En un agujero negro no rotacional el túnel contiene una singularidad, o punto de fuerzas gravitacional y de marea infinitas, que acaba con cualquier osado viajero antes de que pueda atravesarlo. No obstante, en los agujeros negros rotacionales y en los de carga eléctrica el túnel no tiene singularidades. Este hecho permitió en los años sesenta fantasear sobre la posibilidad de que un cosmonauta viajara a través de un agujero negro y emergiera en una región diferente del espacio-tiempo. Mas, apenas transcurridos diez años, se demostró que el túnel de estos agujeros negros era inestable y que cualquier intento de atravesarlo o de enviar una señal a través suyo causaría el colapso del conducto en una singularidad con los mismos resultados que antes comentábamos.

El artículo de los científicos del Caltec evidencia un esfuerzo inteligente por resolver el problema de los viajeros del espacio-tiempo. Los autores sugieren que las leyes de la física permitirían a una civilización avanzada mantener un túnel abierto y estable y, por tanto, unir dos zonas diferentes del espacio-tiempo, verbigracia, una zona del universo con su pasado, lo que convierte el túnel en una máquina del tiempo. El resultado es sorprendente, y, según la opinión de John L. Friedman, de la Universidad de Wisconsin, debe haber algo que se escapa. En algún punto no se ha considerado alguna ligadura fundamental que mantiene la coherencia interna de la física y que evita la posibilidad del viaje hacia el pasado.

¿Cómo podría construirse la máquina del tiempo? Morris, Thorne y Yutsever sugieren que alguna civilización avanzada podría primero "plausiblemente" extraer el túnel de la espuma cuántica —estado del espacio-tiempo que se produce donde la curvatura es tan grande que los efectos cuánticos y relativistas se superponen y se crean túneles. (Tales regiones tienen dimensiones de 10^{-33} centímetros.) Una vez extraído el túnel, mediante técnicas a desarrollar todavía, la civilización lo agrandaría posteriormente hasta un tamaño adecuado para el transporte de personas.

El punto clave es, por tanto, cómo conseguir un túnel que no colapse. Los autores proponen colocar a cada extremo del túnel una placa cargada y perfectamente conductora de la electricidad. Por un fenómeno conocido como efecto Casimir, las placas conductoras causan una violación de la "condición de energía débil". Toda la materia ordinaria obedece esta condición, que puede enunciarse diciendo que la densidad media de energía del material ha de ser no negativa, es decir, cero o positiva. Es esta condición la causante de que se formen singularidades en los agujeros negros. Si se viola, una singularidad no tiene por qué ser inevitable.

Convertir el túnel ahora en una máquina del tiempo no es complicado. En relatividad especial, si dos observadores están en reposo uno respecto a otro, sus relojes funcionan al mismo ritmo y marcan el mismo tiempo. Si, en cambio, un observador acelera respecto del otro, en un viaje que luego lo lleva de nuevo hasta su compañero, el tiempo que marcan los dos relojes ya no es el mismo, siendo el tiempo marcado por el reloj del observador estacionario mayor que el de su compañero. Si se hace que un extremo del túnel se acelere "gravitacional o eléctricamente" alejándose del otro extremo, alcance una velocidad próxima a la de la luz y vuelva al punto de partida, el extremo móvil después del viaje habrá "envejecido" menos que el extremo fijo; puede probarse fácilmente que un viajero moviéndose a través del pasillo desde el extremo móvil hacia el extremo estacionario habrá viajado hacia atrás en el tiempo.

La máquina del tiempo del Caltech así descrita tiene una ventaja respecto a sus predecesoras: el túnel parece ser estable. Sin embargo, los autores se muestran reticentes a afirmarlo categóricamente. Además, para que el efecto Casimir dé el fruto deseado, las placas han de estar colocadas muy próximas, a una distancia menor que el radio de un electrón, y esto podría resultar prohibido.

Tecnología de colmena

Howard T. Kerr es un ingeniero del laboratorio nacional de Oak Ridge, que ha diseñado componentes para reactores nucleares y para el programa de Iniciativa de Defensa Estratégica (IDE). Kerr es también un apicultor que cuida 140 colonias de abejas y que dirige un grupo denominado los apicultores de Tennessee. Hace más de diez años, preocupado por la inmigración de un tipo de abejas "africanas" o "asesinas", que viajan hacia el norte procedentes de América del Sur y que suponen una amenaza para la apicultura de su país, decidió aplicar su talento para detenerlas, o como mínimo para comprenderlas.

Se esforzó por desarrollar un método para la detección y seguimiento de los enjambres de estas abejas. Su primera propuesta fue simple: señalar unos cebos con isótopos radiactivos y efectuar el seguimiento por toda la región utilizando contadores Geiger. Sin embargo, pronto se dio cuenta de los proble-



2. TRANSMISOR MINIATURIZADO fijado al dorso de una abeja, que permite a los investigadores seguir su recorrido y, por consiguiente, registrar sus hábitos de alimentación y apareamiento. El dispositivo funciona gracias a unas pequeñas células solares y transmite pulsos infrarrojos que se detectan en un radio de más de 1000 metros. Diedre D. Falter, Kelly Falter, Kenneth Valentine y Gary T. Alley, del laboratorio nacional de Oak Ridge, desarrollaron el dispositivo por sugerencia de los estudiosos de la abeja africana. Durante esta primavera está prevista la experimentación de un prototipo.

mas que comportaba su propuesta y pensó en la utilización de una cámara infrarroja para distinguir los enjambres, aunque se encontró con el problema de cómo separar las abejas africanas de otros animales emisores de calor o incluso de otros tipos de abejas.

A comienzos de los años 80, Kerr asistió a una conferencia dictada por Anita M. Collins, del Departamento de Agricultura de los EE.UU., en la que se comentó el distinto zumbido que producían las abejas africanas comparadas con las abejas nativas de Norteamérica. Trabajando conjuntamente con Collins, Kerr descubrió que las abejas africanas baten sus alas a un ritmo superior al de las norteamericanas y producen, por tanto, un zumbido más agudo. Aprovechando esta característica, Kerr diseñó un analizador acústico en el que se enciende una luz roja o una luz verde al detectar una abeja africana o americana, respectivamente.

Kerr y otros estudiosos que comparten su preocupación por el problema de las abejas africanas han buscado, recientemente, la forma de rastrear no sólo enjambres, sino abejas solitarias. Los colegas de Kerr proyectan crear un transmisor infrarrojo accionado por energía solar que podrá montarse sobre el dorso de una abeja y transmitirá con un alcance superior a 1,5 kilómetros. Kerr también ha "equipado" abejas con diminutos reflectores que reenvían un haz láser directamente a la fuente. Con todos estos dispositivos, podrían rastrear a las reinas y a los zánganos de la especie africana, establecer modelos de apareamiento y diseñar estrategias para evitar su reproducción.

Kerr y sus colegas han pedido prestado un láser Doppler a la IDE. Este dispositivo detecta el movimiento de objetos distantes —como ojivas nucleares— con gran precisión. El aparato podría apuntar a una abeja y determinar la frecuencia de su zumbido a miles de metros de distancia.

Virus y gusanos de la fauna informática

La noticia saltó a la luz pública, en noviembre del año pasado, cuando un grupo de programas diseñados por un joven reventador de computadoras irrumpió en la red Internet, red informática que conecta miles de computadores de investigación en los EE.UU., inutilizándola temporalmente. Los programas virus ejecutaron una especie de salto electrónico, extendiéndose de máquina en máquina, efectuando múltiples copias de sí mismos y colapsando diversas tareas de la red. La seguridad nacional de los Estados Unidos no se vio amenazada (el Pentágono está conectado a la Internet de forma limitada), pero semejante intromisión abrió graves interrogantes sobre la seguridad de otras redes más vitales: las que transfieren cada día unos 700.000 millones de dólares entre los distintos bancos del país.

Según Charles Wilk, de la Oficina de Asesoramiento Tecnológico del Congreso, el reto que se plantea a los diseñadores de las redes de comunicación informática es siempre el mismo: ¿cómo facilitar el uso de la red a sus usuarios legítimos y evitar la intromisión de usuarios no autorizados?

Según Randall L. Frank, responsable de informatización de la Universidad de Michigan, los artífices de la Internet decidieron conscientemente dotar a la red de una gran funcionalidad a costa de sacrificar parte de su seguridad. En realidad, los resquicios utilizados por el "gusano" de la Internet eran bien conocidos por los expertos, pero sólo en unos pocos nudos de la red se había invertido el tiempo suficiente para cerrarles el paso.

La gran accesibilidad a todo tipo de usuarios —desde estudiantes de biología hasta fabricantes de microcircuitos—, la gran velocidad de transmisión y su diseño abierto son las características que han convertido a la Internet en algo tan vulnerable. Ni que decir tiene que esos rasgos definen también su eficacia. La posibilidad de ejecutar un programa en una máquina de la red desde otra máquina, por ejemplo, es la base de los sistemas de distribución de ficheros, de los servicios de directorio de la red, del correo electrónico y de muchas funciones más. Eugene H. Spafford, de la Universidad de Purdue, opina que las redes locales, que combinan también un rápido flujo de datos con un acceso fácil y con un nivel de seguridad bajo, pero sin conexiones con todo el país, pueden constituir el próximo objetivo de algún intruso. Con un ordenador personal y un conector de cable coaxial pueden "pincharse" la mayoría de estas redes.

La seguridad guarda una relación inversa con la flexibilidad y con el rendimiento. La red conocida bajo las siglas UUCP (conecta ordenadores que funcionan con el sistema operativo UNIX), bastante accesible, transmite también datos por medio de la red telefónica, con una capacidad de transporte de unos mil bits por segundo, en contraste con los 50.000 a tres millones de bits por segundo que transportan las conexiones de la Internet. Aunque un virus similar al de la Internet podría atacar la UUCP, Spafford comenta que la "infección" afectaría sólo a un puñado de máquinas durante las más o menos veinticuatro horas que tardaría en ser descubierta. La red Fedwire, que transfiere casi 700 millones de dólares cada día entre instituciones financieras americanas, si bien más segura, sufre transacciones fraudulentas que le cuestan a sus usuarios cada año varios cientos de millones de dólares.

La desconexión del mundo exterior para ganar en seguridad produciría mayores pérdidas. ¿Cómo puede hacerse, pues, una red segura? La respuesta, si existe, es un secreto militar, pero se basará en buena parte en las técnicas criptográficas. No sólo han de codificarse las palabras clave, sino también las propias transmisiones de la red. Sin embargo, la codificación reduce el rendimiento de la red, requiere un soporte físico adicional e implica gastos de tiempo y de gestión para distribuir las claves entre los usuarios autorizados.

Tampoco la criptografía constituye la solución mágica. Los usuarios podrían revelar sus claves, y los ataques que sufrirían los ordenadores serían más refinados. El gusano de la Internet hurgó en las palabras clave criptografiadas re-

corriendo su propia lista criptografiada de palabras clave más usadas. Varios científicos han estimado que criptografiar un diccionario entero de 50.000 palabras y someterlo a prueba con las palabras clave puede costar menos de una hora.

Para algunas redes, sin embargo, la criptografía merecería la pena. Courtney cita la red interna de la compañía IBM: en Europa funciona por medio de líneas telefónicas controladas por compañías telefónicas estatales, como también son estatales o semiestatales algunas compañías de ordenadores que representan la competencia directa de la IBM. Sin codificación, nadie usaría la red. Lo mismo ocurre con Milnet, la red de transmisión de información secreta del Departamento de Defensa.

Reeducación del sistema inmunitario

Un viejo sueño que la investigación médica viene acariciando es el de dejar en suspenso parte del sistema inmunitario mientras el resto sigue vigilante. Los que acaban de someterse a un trasplante han de tomar ciclosporina A y otros fármacos inmunosupresores para evitar el rechazo del tejido extraño por el sistema inmunitario. Pero el tratamiento habrá de prolongarse, por lo común, toda la vida del paciente, con el inconveniente añadido de que los fármacos no sólo impiden el rechazo del trasplante sino también la reacción del sistema inmunitario ante las infecciones. ¿Y si pudiésemos enseñarle a nuestro sistema inmunitario a considerar propio el nuevo tejido y olvidarse, por tanto, del mismo, como si fuera uno más de los que componen el cuerpo? Ese planteamiento, en los ensayos clínicos ya realizados, ha comenzado a rendir sus frutos.

Jerzy W. Kupiec-Weglinsky y sus colaboradores, de la facultad de medicina de la Universidad de Harvard y del hospital bostoniano Brigham and Women's emplean anticuerpos monoclonales que rastrean sus efectores o dianas, alojados en un grupo de células del sistema inmunitario, en el caso exclusivo de que una sustancia extraña ponga a estas células en acción. Nos referimos a las células *T*, una clase de linfocitos que desempeña un papel capital en el rechazo de trasplantes. Los efectores buscados por los anticuerpos en la superficie de las células *T* activadas son los receptores de interleucina-2, sustancia que estimula la proliferación celular.

Ese planteamiento da por supuesto que, al bloquear los receptores de interleucina-2 que hay en las células *T* activadas, los anticuerpos monoclonales evitarán la proliferación aludida. Las células *T* que no se hallaran activamente comprometidas en una respuesta inmune, esto es, las que no supieron ver en el órgano trasplantado un objeto extraño, se reservarían para misiones posteriores. Se trata, en definitiva, de remedar el proceso natural en virtud del cual el sistema inmunitario acaba algunas veces por aceptar como propio un órgano trasplantado.

El plan funciona con animales de experimentación: las ratas que se someten a un tratamiento de anticuerpos contra el receptor de interleucina-2 no logran rechazar el tejido cardíaco trasplantado. Ensayos muy recientes, en ratas también, confirman que las células *T* activadas cesan de replicarse tras recibir el tratamiento de anticuerpos. Por contra, comienzan a predominar las células *T* supresoras, que bloquean la respuesta inmunitaria. Más aún; si los anticuerpos se administran juntamente con ciclosporina A, potencian el efecto represor ejercido por el fármaco contra el intento de rechazo del trasplante.

El paso de la experimentación animal al ser humano lo dieron, en 1986, Jean-Paul Soulillou e Y. Jacques, del Instituto Nacional de la Salud e Investigaciones Médicas (INSERM), en Nantes. Afirman que los episodios de rechazo registrados en pacientes que han recibido un trasplante de riñón cayeron muy por debajo, cuando se les prescribía un tratamiento de anticuerpos contra los receptores de interleucina-2 junto con fármacos inmunosupresores, que si sólo se les ofrecían las drogas. Kupiec-Weglinsky y sus colaboradores abundan en esa idea tras descubrir que el tratamiento conjunto de anticuerpos y fármacos retrasan los episodios de rechazo y rebajan su número.

Samuel Strober y sus colegas de la facultad de medicina de la Universidad de Stanford han seguido otro camino. En vez de trabajar con anticuerpos monoclonales, recurren a la radiación para desarmar selectivamente a las células *T* antes de la intervención quirúrgica. En una irradiación linfoide total, así llaman su técnica, se polariza la radiación sobre las zonas donde se hallan las células *T* desarrolladas, de manera particular en los ganglios linfáticos. Queda protegida la médula ósea, que contiene las células precursoras o encargadas de regenerar sin cesar el sistema inmunitario. La cuestión es dejar inutilizadas las células *T* que podrían reaccionar contra el trasplante, pero sin acabar, de manera definitiva, con el sistema inmunitario. Y así, una vez el órgano trasplantado lleva asentado varias semanas en su nuevo huésped, el sistema defensivo de éste, regenerado, lo da ya como propio. Strober explica cómo tres individuos que recibieron un trasplante de riñón presentan injertos de excelente implantación y, hoy, no precisan drogas inmunosupresoras; otros pacientes sometidos a una terapia parecida necesitan dosis más bajas de fármacos inmunosupresores que lo recetado habitualmente.

De acuerdo con otra línea de investigación, la manipulación genética podría tener la clave de la supresión de una respuesta inmunitaria específica. Joren C. Madsen, Kathryn J. Wood y sus colaboradores, del Hospital John Radcliffe, de Oxford, hicieron público, el año pasado, lo siguiente: en ratones previamente tratados con células que se les habían extraído para su manipulación genética, podía inducirse una tolerancia específica de un injerto de tejido cardíaco. Los fibroblastos, que de esas células precursoras del tejido conjuntivo se trataba, habíanse manipulado para que incorporaran genes de histocompatibilidad procedentes del ratón donante del tejido a implantar. Los genes de histocompatibilidad determinan proteínas que se manifiestan en la superficie celular y constituyen importantes marcadores del sistema inmunitario, al que ayudan a distinguir lo propio de lo "ajeno".

Los investigadores de Oxford sugieren que, durante el tratamiento previo con las células sometidas a ingeniería genética, el sistema inmunitario de los ratones que habrían de ser receptores del trasplante se habituaron a las nuevas proteínas de histocompatibilidad, y las consideraron propias. Una vez se produjo el trasplante, no hubo reacciones de rechazo de las proteínas de histocompatibilidad del tejido implantado. Para sorpresa de los expertos, cierto gen del donante podía, por sí solo, prevenir el rechazo, aun cuando las células del injerto portaran una teoría de proteínas de histocompatibilidad distintas. Los investigadores proponen, a modo de hipótesis explicativa, una jerarquía en el rango de importancia de los marcadores: la tolerancia a un marcador "dominante" podría redundar en tolerancia a distintas proteínas que se hallaran en la misma célula. Wood expresa su confianza en descubrir los marcadores dominantes en las células humanas y, llegado el caso, aplicar la técnica a los pacientes.

Ciencia y empresa

Mercaderes de la paz

"Una difícil partida de naipes", así ha definido el presidente Bush uno de los principales legados heredados de la administración Reagan: las conversaciones de reducción de armas estratégicas (START). Se pretende, a través de las mismas, reducir hasta un 50 por ciento de las armas estratégicas nucleares. Bush ha dicho también que se propone alcanzar un tratado de prohibición de armas químicas y que se esforzará por limitar los arsenales convencionales. Si la paz continúa arrasando, ¿qué le aguarda a la industria de la defensa? Por paradójico que parezca, las perspectivas son prometedoras.

Para empezar, ningún tratado START reducirá de manera drástica los gastos militares, ni dejará en paro a miles de ingenieros y directivos de las empresas del sector. No se barrunta ningún recorte del presupuesto de defensa. Así las cosas, el misil MX y el bombardero *Stealth* (furtivo) entrarían en servicio aun cuando se firmara un tratado START: son ingenios mucho más refinados y caros que los sistemas a los que sustituyen. Por no citar la demanda de equipos costosos (por ejemplo, satélites de reconocimiento) y sistemas de ordenadores necesarios para analizar el torrente de información procedente de los ojos y oídos en órbita, que habrá de aumentar.

Dentro de un pronóstico para diez años, en el que se supone la firma de un acuerdo START, en los cinco primeros el sector de la industria electrónica norteamericana llegó a la conclusión siguiente: aunque la presión sobre el presupuesto federal hace probable una reducción del 5 por ciento en los fondos destinados a defensa en los próximos cinco años, el valor de los sistemas electrónicos permanecerá virtualmente inalterado durante ese período. El pronóstico predice nuevas necesidades de gastos para la modernización de las fuerzas estratégicas, así como para "costosos sistemas de verificación, muy refinados".

Cabría la posibilidad de que nuevas clases de armas impidieran el recorte presupuestario. Simón Ramo, cofundador de la TRW, prevé una futura desviación de los fondos asignados al armamento nuclear estratégico hacia el armamento convencional de alta tecnología y hacia sistemas de defensa y alerta que compensen la superioridad del Pacto de Varsovia en hombres y material.

¿Qué nuevos gastos exigiría un tratado START? No sabemos todavía cuáles podrían ser sus cláusulas. La virtual imposibilidad de contar misiles de crucero de las bodegas de submarinos nucleares sin inspecciones inaceptablemente inquisitivas sigue siendo un problema importante, como lo es la indefinición sobre la prohibición o no de misiles móviles. En vez de prohibir cualquier clase de misiles, de un acuerdo START se espera que se limite a fuerzas estratégicas durante la mayor parte del tiempo y a determinadas zonas sujetas a inspección normal.

A corto plazo, la vigilancia requerida para cumplir un acuerdo START descansaría principalmente sobre sistemas de reconocimiento ya proyectados y que los servicios de inteligencia desean, se llegue o no a un acuerdo START. Cierto es que los tratados refuerzan los argumentos a favor de tales sistemas. El comité del Senado sobre los servicios de inteligencia aprobó su solicitud de seis nuevos satélites-espías Lacrosse con un coste total de entre 6000 y 12.000 millones de dólares, y señaló la necesidad de verificar el tratado de fuerzas nucleares de alcance intermedio (INF).

Aun cuando los primeros sistemas estén ya en proyecto, el acuerdo sobre armamentos aumentaría las exigencias sobre los mismos. El tratado START elevaría "hasta un nivel sin precedentes la presión sobre medios técnicos nacionales (satétiles y otros sensores)", según Roger L. Hagengruber, director del desarrollo de sistemas de verificación de tratados en los laboratorios nacionales de Sandia. Si bien se da por sentado que no hay sistema de verificación que no pueda burlarse, a los técnicos compete garantizar la insignificancia militar del señuelo o el engaño.

Los términos plausibles de un tratado START otorgarán mayor primacía al reconocimiento mediante satélites: el tratado que no elimine clases enteras de armas resulta, por sí mismo, de más difícil verificación que un acuerdo como el tratado INF, que prohíbe todo misil de alcance intermedio. Hagengruber sostiene que el servicio de inteligencia necesitará imágenes de la Unión Soviética mucho más frecuentes y pormenorizadas que las ahora disponibles si se quiere tener la seguridad de que no se están camuflando misiles móviles ilegales.

Kosta Tsipsis, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, estima que los gastos totales en satélites y medios de reconocimiento relacionados con ellos ascienden ahora a unos 20.000 millones de dólares (las cifras son "negras" –altamente reservadas– como lo son todos los detalles de los sistemas). El "considera probable que el total aumente" a raíz del tratado START. Según Jeffrey Richelson, de los Archivos de Seguridad Nacional, grupo de investigación privado, son inminentes importantes mejoras en el estado del arte. Los sistemas futuros proporcionarán al mando militar imágenes a las pocas horas de estar tomadas. Para Richelson, los satélites Lacrosse (desarrollados por Martin Marietta) portarán el radar de apertura sintética, capaz de producir imágenes detalladas incluso de noche o con cielo cubierto de nubes. Otro sistema para satélites, el KH-12, construido por la división de misiles y espacio de la compañía Lockheed, alcanza una resolución de centímetros al descender a bajas altitudes para "primeros planos", mediante el uso de un





SISTEMA DE IDENTIFICACION de misiles, desarrollado en los laboratorios de Sandia. El número de identificación que porta la carcasa del misil se recubre con una resina epóxica, de especial dureza, que contiene partículas reflexoras de mica, distribuidas al azar. Las reflexiones que emiten ante la iluminación desde distinto ángulo (compárense ambas fotografías) dibujan una signatura irrepetible

"espejo de goma" controlado por ordenador, que cambia de forma para compensar la distorsión atmosférica. Cada KH-12 cuesta más de 500 millones de dólares.

Los satélites de inteligencia y comunicaciones desempeñarían un papel esencial en la verificación de los tratados START al interceptar las comunicaciones entre los centros de mando y las dotaciones de los misiles móviles, cree Richelson. Tsipsis estima que la espectrometría de infrarrojo –para detectar el calor provocado por la actividad industrial y militar– intervendrá de manera decisiva en la vigilancia del cumplimiento de los tratados. Se está pensando en una flota de satélites ligeros y baratos de reconocimiento, que aporten seguridad y cobertura por medio de la redundancia.

Espigar información útil del torrente de datos que tales sistemas producirán equivaldrá a "beber de una manguera de incendios", sentencia Hagengruber. Para él, la inteligencia artificial puede resultar útil en tales análisis. Se están estudiando también ordenadores que remeden las redes nerviosas.

Comparados con lo que se necesita para la vigilancia electrónica, los sistemas empleados en la verificación *in situ* son pura cacharrería, construidos de piezas ya existentes en el mercado. Débese ello a una doble razón: en primer lugar, la lejanía de las zonas donde estos sistemas se emplearán; en segundo lugar, la voluntad de no superar un nivel rudimentario a fin de proteger, de la inspección soviética, secretos norteamericanos y mantener la tecnología occidental de punta fuera del alcance de los rusos.

El trabajo de campo ofrece, sin embargo, estímulos para las compañías que se especializan en análisis y elaboración de sistemas. En ese sentido, los Estados Unidos han propuesto que los misiles aprobados porten una señal de identificación que los distinga en el recuento. Cualquier misil que carezca de esa marca se le supondría de fabricación ilegal. En el laboratorio nacional de Argonne, los expertos están investigando el uso de microscopios electrónicos portátiles para examinar misiles que detecten minúsculas rayas imposibles de copiar. Se han investigado también "etiquetas" electrónicas, aunque algunos observadores temen que pudieran imitarse por aplicación de la "ingeniería hacia atrás". Para asegurarse de que los misiles de crucero equipados con armamento convencional no se destinan fraudulentamente a usos nucleares, se han propuesto varios sistemas dotados de cierres sellados a prueba de abertura ilegal. Pero los críticos objetan que, en caso de crisis, los cierres se abrirían a pesar de todo.

Hay varios laboratorios que están trabajando en sensores destinados al recuento de las cabezas explosivas incorporadas en misiles que salen de posiciones controladas sin abrir la cubierta. Se están estudiando sensores que usan rayos gamma y haces de neutrones. Según Alexander Devolpi, de Argonne, se pretende crear un sistema capaz de contar las cabezas explosivas sin revelar el secreto de su construcción. Los laboratorios trabajan también sobre sensores autónomos que descubran la salida de equipos ilegales de las zonas controladas. John R. Harvey, del laboratorio nacional Lawrence Livermore, le está dando vueltas a lo que reputa "una idea lejana": emplear robots para patrullar por dichas zonas.

Aunque los fabricantes se resisten a revelar sus planes para los equipos de verificación, se puede avanzar algo sobre las exigencias *in situ* de un tratado START en comparación con lo requerido por el INF. Hughes Aircraft ganó un contrato de 42 millones de dólares para un puesto de inspección permanente en la Unión Soviética especificado por el tratado INF, la planta de montaje de misiles en Votkinsk. En este lugar se usará un nuevo sistema de exploración por rayos X construido por Bechtel National, que cuesta 10 millones de dólares, para detectar misiles prohibidos que pudieran salir del arsenal. Una fuente del Congreso estima que el coste total de las inspecciones *in situ*, en el ámbito del tratado INF –que incluye inspecciones avisadas con poca anticipación en otros puntos especificados– sería de unos 200 millones de dólares por año durante 13 años. La inspección *in situ*, en el ámbito de un tratado START, podría costar un total de 4000 millones de dólares en 20 años, aunque el número de puntos a inspeccionar sería de 10 a 20 veces mayor. La cantidad de equipos, pese a ello, seguiría siendo pequeña.

La verdad es que el propio desmantelamiento de armas, exigido por el tratado START, podría convertirse en un sector industrial que moviera 1000 millones de dólares. Podría equivaler a cierta clase de minería de alta tecnología. Theodore R. Taylor, ingeniero de armas nucleares, estima que, en el desmantelamiento de las cabezas explosivas, el valor del uranio enriquecido y potencialmente liberado para usos pacíficos en producción de energía alcanzaría miles de millones de dólares.

Además del START, otros tratados crearían pequeños mercados. El Consejo de Defensa de los Recursos Naturales está instalando una red de estaciones de vigilancia sísmica automática en la Unión Soviética por un valor de 500.000 dólares cada una; con el tiempo, confía en tener más de 20 estaciones y atraer la ayuda del gobierno. Se presume que se necesitarían también sensores remotos para vigilar el cumplimiento de un tratado de armas químicas y uno para armas convencionales. Si todo va bien, la verificación de los tratados de paz puede convertirse en una industria pujante. (Tim Beardsley.)

Motor de combustión externa

Los automóviles tienen una delicada digestión: sus motores de combustión interna precisan, para vivir, una dieta de gasolina limpia y altamente refinada o combustible diésel. Los motores de combustión externa no son tan exigentes. Tras años de investigación en la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y su contratista Mechanical Technology Incorporated (MTI), se ha creado uno que está ya listo para salir al mercado. Se trata del motor Stirling, favorito desde hace largo tiempo, de los que buscaban opciones alternativas a la combustión interna. El motor Stirling de combustión externa funciona también con gasolina, keroseno, etanol y otros combustibles líquidos. Con pequeñas modificaciones, puede quemar gas natural y, a lo mejor, carbón pulverizado.

Los motores convencionales de combustión interna deben su nombre a que detonan mezclas de combustible y aire en el interior de cámaras provistas de un pistón. Los gases ardientes, al expandirse tras la explosión, empujan el pistón y proporcionan la fuerza utilizable. Pero las explosiones producen hidrocarburos parcialmente quemados y pegajosos que se adhieren al motor e impiden, con el tiempo, el movimiento del pistón. Para evitar tal acumulación, los automóviles consumen sólo petróleo refinado.

Los motores Stirling sortean el peligro de la acumulación aislando la combustión en una cámara externa. El calor generado pasa a un "fluido de trabajo" –generalmente hidrógeno o helio– herméticamente encerrado, que se expande y mueve los pistones. Al no haber productos de combustión que entorpezcan el funcionamiento de las partes móviles, los usuarios de motores Stirling gozan de mayores posibilidades

a la hora de escoger el combustible. Este, además, se quema continua y completamente; por ello, los motores Stirling incineran muchos de los contaminantes desprendidos por los motores de combustión interna. Los motores Stirling no necesitan, pues, los conversores catalíticos, muy caros, para reducir sus emisiones.

Aunque han existido modelos de motores Stirling desde principios del siglo XIX, cuando el clérigo escocés Robert Stirling inventó el motor, los problemas técnicos de ingeniería dificultaron su desarrollo hasta hace poco. En Holanda, durante la segunda guerra mundial, se construyeron motores Stirling que funcionaban y se perfeccionaron más tarde en Suecia. En ellas, ciertas piezas que habían de funcionar a altas temperaturas estaban fabricadas de aleaciones que contenían cobalto, metal de interés estratégico y escaso. Por si fuera poco, aquellos prototipos daban potencias demasiado bajas para poder competir con los modelos de combustión interna, menos proclives a las averías.

El interés en los motores Stirling renació después de la crisis del petróleo de la década de los setenta. En 1978, el Departamento de Energía y la NASA subvencionaron un proyecto de investigación de 10 años de duración y un coste de 100 millones de dólares para la viabilidad de tales motores. La investigación en el dominio de los materiales ha conseguido metales más ligeros y menos caros que sustituyen a las aleaciones de cobalto y han obtenido mejores cierres herméticos que prolongan la vida útil del motor. Los mandos de acción rápida mediante microprocesadores agilizan también la respuesta del motor al acelerador.

Según MTI, el nuevo motor Stirling Modelo II compite, en tamaño, peso y prestaciones, con los motores convencionales de ignición por chispa. Algunos motores experimentales instalados en furgonetas de la Fuerza Aérea han cubierto casi 30.000 kilómetros, consumido diversos carburantes y rendido, siempre, buenos resultados. Esas furgonetas podían aprovechar, así, una cuantiosa provisión de petróleo que hasta entonces se había desechado: el combustible sucio purgado de los reactores en reparación, que no se puede reciclar para otros aviones. Se ha instalado un Modelo II en una furgoneta del servicio de correos para pruebas de funcionamiento de mayor duración en condiciones meteorológicas muy dispares. Aunque todavía no se dispone de datos oficiales de la Oficina para la Protección Ambiental, se espera que mejore el consumo de combustible de la furgoneta postal en más del 20 por ciento.

Al margen de estos primeros éxitos, los motores Stirling tardarán en instalarse en automóviles comerciales. Es más probable que demuestren primero su valor energético en generadores eléctricos, bombas de calefacción e irrigación y vehículos militares. (John P. Rennie.)

¿Qué pasa con las tarjetas inteligentes?

Hace algunos años, las "tarjetas inteligentes", tarjetas de plástico que llevaban microprocesadores incorporados, se anunciaban como la última ola en el negocio de las tarjetas de crédito. Los consumidores transportarían bancos de datos en su bolsillo que contendrían desde balances de cuentas bancarias hasta huellas dactilares. El fraude en las tarjetas de crédito descendería y sus ventajas aumentarían. Pero el vuelo de plástico corriente a silicio nunca llegó a despegar. Las tarjetas inteligentes son, todavía, "una tecnología que espera una buena aplicación", afirma Einar Asbo, director de aplicaciones de la compañía Visa.

Las tarjetas inteligentes ponen los datos e información necesaria para autorizar una venta en la propia tarjeta, en vez de un ordenador en la oficina de autorización o en el banco emisor. La tarjeta mantiene en memoria el balance de la cuenta de su propietario, la actualiza con cada compra (y con cada pago comprobado), y una clave personal de acceso (PIN) garantiza que el usuario es el legítimo propietario de la tarjeta. Una tarjeta inteligente puede almacenar los datos de múltiples cuentas, con lo que se pone fin al supuesto prestigio de una billetera atiborrada de tarjetas de plástico.

Las tarjetas de crédito pueden copiarse con un equipo magnético barato. No ocurre eso con la tarjeta inteligente, capaz de cifrar sus datos y entregarlos sólo en respuesta a un santo y seña especificado.

Las compañías expedidoras, gobiernos y fabricantes, entre ellos Bull, S. A., empresa francesa del sector de la informática, han tratado de hallar una buena aplicación para la tarjeta inteligente. Tal vez el esfuerzo mejor coordinado se haya realizado en Francia, donde en 1985 Carte Bleue solicitó a Bull 12 millones de tarjetas inteligentes. Se han entregado ya un millón. En los Estados Unidos, MasterCard patrocinó la tarjeta inteligente. En Japón, Visa International, que comenzó, de manera experimental en 1986, impulsa el manejo de las tarjetas inteligentes, incluida una "superinteligente", con teclado y pantalla desarrollados conjuntamente con Toshiba.

¿Por qué, entonces, no se ha generalizado el uso de las tarjetas inteligentes? En los Estados Unidos, la culpa la tiene la falta de acuerdo sobre normalización entre MasterCard y Visa.

Centrando más la cuestión: ¿ofrecen las tarjetas inteligentes una manera más económica de realizar la mayoría de las operaciones asignadas hoy a las tarjetas tontas? La capacidad que las tarjetas inteligentes tienen para autorizar transacciones sin la aprobación de una oficina central adquiere interés sólo allí donde las telecomunicaciones sean caras. (En un lugar donde eso sucede, Noruega, una asociación de bancos ha pedido medio millón de tarjetas inteligentes para transferencias electrónicas de fondos.) Y aun cuando las tarjetas inteligentes podrían reducir las pérdidas experimentadas en tarjetas de crédito por fraude e impago, las pérdidas son insignificantes: un dólar por tarjeta y año.

Mientras tanto, los 2000 a 8000 caracteres que pueden almacenarse en una tarjeta inteligente están buscando trabajo útil. Las actuales tarjetas de banda magnética pueden almacenar unos 240 caracteres de datos, suficiente para el número de la cuenta, nombre, dirección, institución expedidora y preferencia en asiento de avión, y todavía sobran 100 caracteres. La información financiera añadida en una tarjeta inteligente ocupa algo más de espacio. Los buscadores de mercados en los Estados Unidos y otros países están rellenando con imaginación el espacio libre con toda clase de datos: historial clínico, bebida preferida, etc.; pero sin éxito.

Las tarjetas inteligentes están encontrando nuevos nichos como tarjetas de débito. Por las tarjetas de débito el cliente paga un precio especificado que puede después redimir en mercancías y servicios. Han estado siempre limitadas a aplicaciones de escaso valor, tales como aparcamiento, peajes y máquinas fotocopiadoras.

En Francia, las tarjetas inteligentes de débito eliminan el cambio en moneda pico que se precisa en llamadas telefónicas y parquímetros. Las tarjetas de débito son particularmente atractivas para las instituciones financieras, ya que su poseedor paga al principio y la institución puede emplear el dinero hasta que se cancela la transacción. En el sistema existente de tarjetas de crédito, es el cliente el que se aprovecha de la cantidad flotante. (Paul Wallich.)

Terrenos configurados

Un fenómeno físico muy corriente da forma a estas manifestaciones espectaculares de geometría natural

William B. Krantz, Kevin J. Gleason y Nelson Caine

Da la impresión de que en la naturaleza el orden es la excepción, no la regla. La regularidad del Sistema Solar, la compleja organización de los seres vivos, los retículos de los cristales, no pasan de ser pautas transitorias en una gran disolución tendente al caos. El tema dominante en el universo es el aumento de entropía. Tanto más admirables, pues, los ejemplos de orden que la naturaleza nos ofrece. Y entre ellos, uno particularmente fascinante es la curiosidad geofísica conocida por terreno configurado.

La expresión "terreno configurado" alude a las regularidades naturales definidas por piedras, por la cubierta térrea o la topografía del suelo, que pueden adoptar formas circulares, poligonales o en bandas. En este artículo limitaremos nuestra atención a las regularidades que acontecen en aquellos suelos muy húmedos o empapados en agua que se hallan repetidamente sometidos a ciclos de congelación y deshielo. Las configuraciones a que nos referimos se encuentran repartidas por todo el mundo; a nivel del mar en las regiones polares y subpolares, y, a elevaciones mayores, en las zonas de clima templado.

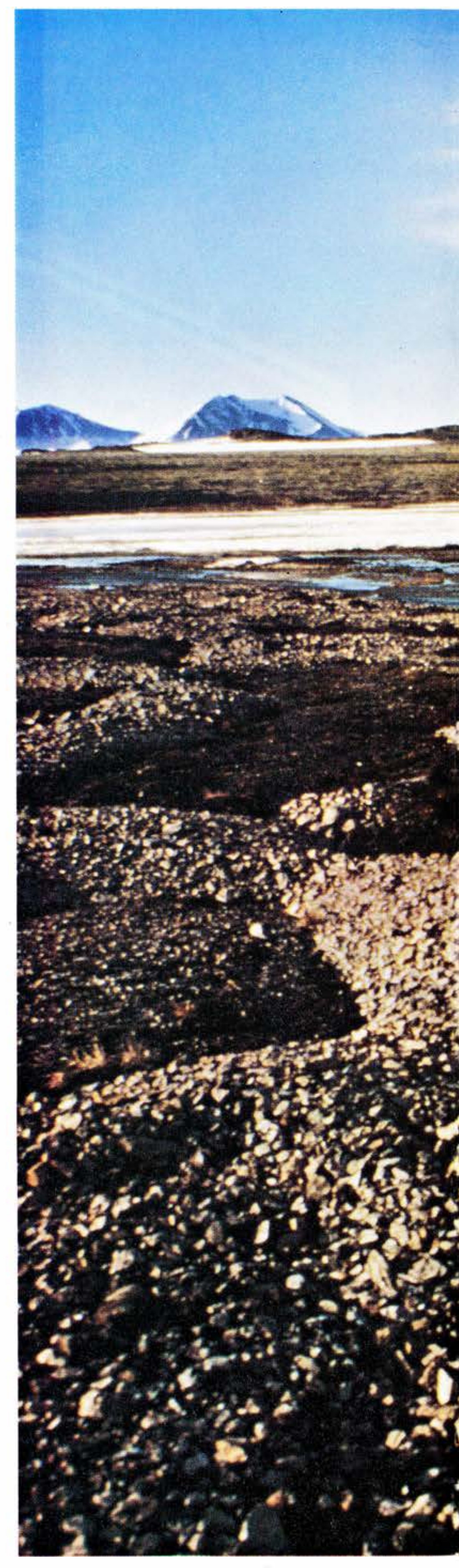
Algunas de las configuraciones se extienden sobre superficies de kilómetros cuadrados, mientras que el motivo que se repite en otras apenas si llega a cubrir un metro. En algunas de ellas hay pedruscos del tamaño de un hombre, mientras otras consisten en variaciones localizadas de la vegetación. Existen configuraciones activas, todavía en formación, en tanto que otras son restos inactivos, que se formaron durante la pasada glaciación.

Los terrenos configurados han sido objeto de indagación científica desde hace más de un siglo; uno de los primeros en investigarlos, el geólogo sueco Fredrik V. Svenonius, publicó sus observaciones en 1880. En 1907, otro sueco, Otto Nordenskjöld, propuso un mecanismo de formación de estos terrenos que nosotros, casi 80 años después, hemos desarrollado hasta convertirlo en un modelo predictivo válido. Nordenskjöld propuso que el mecanismo de formación del suelo configurado era la convección libre.

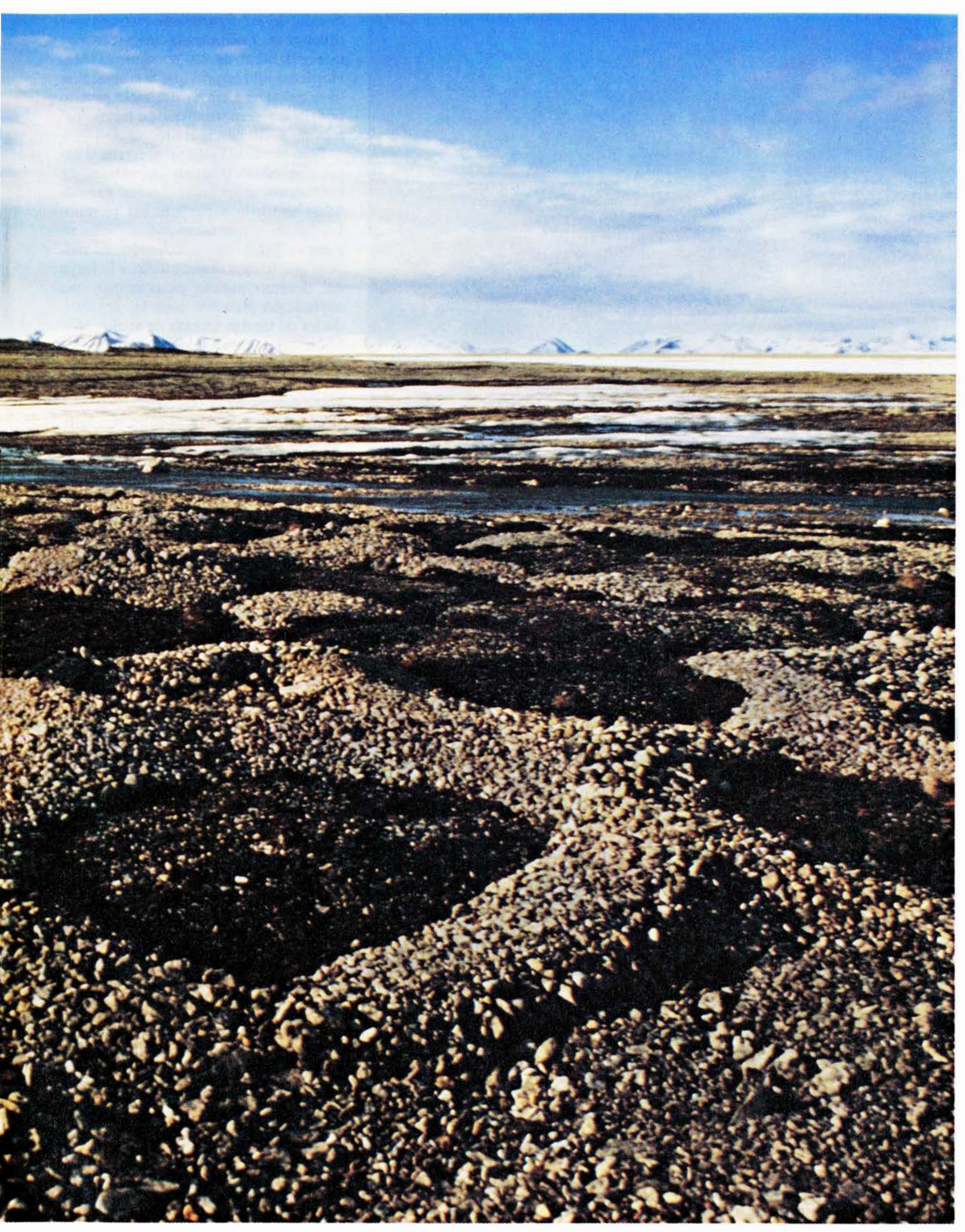
La convección libre es el familiar fenómeno que hace rodar tumultuosos los nubarrones antes de una tronada y es causa de las aguas y danzas que traza el aire sobre el asfalto de la calzada caldeada por el sol. La convección puede producirse al calentar un fluido por su parte inferior: el fluido caliente más próximo a la fuente calorífica se expande, perdiendo densidad; la gravedad arrastra entonces hacia abajo el fluido más denso, lo que permite la ascensión del menos denso. Si se suministra calor de forma continua, se puede establecer una circulación regular.

El fluido, al circular, se descompone en órbitas cerradas, "células", capaces

WILLIAM B. KRANTZ, KEVIN J. GLEASON y NELSON CAINE abordaron la cuestión de los terrenos configurados desde ópticas un tanto dispares. Krantz, que enseña ingeniería química en la Universidad de Colorado en Boulder, se interesó por el tema mientras trabajaba, años atrás, en la gasificación subterránea del carbón. Hoy se encuentra en la Universidad de Oxford. Gleason realizó la tesina de licenciatura sobre esos terrenos, bajo la tutoría conjunta de Krantz y Caine; está ahora preparando su tesis doctoral en Boulder. Caine, profesor universitario de geografía, se halla también adscrito al Instituto de Investigación Artica y Alpina; los terrenos configurados entran de lleno en sus investigaciones sobre periglaciarismo.



1. CIRCULOS DE PIEDRA de unos tres metros de diámetro constituyen un motivo decorativo en la pe-



nínsula Broggerhalvoya, en Spitzbergen occidental, Noruega. La capa superficial de suelo empapado en agua se congela todos los inviernos y se deshiela en primavera. Los autores opinan que la forma y configuración de los círculos está dictada por la convección libre, al deshelarse el suelo.





2. LOS POLIGONOS DE PIEDRA pueden exhibir formas hexagonales casi perfectas (*arriba*). En terreno nivelado, los polígonos forman una malla continua (*abajo*). Estas configuraciones surgieron a resultas de ciclos de congelación y deshielo diarios en lugar de estacionales; sus diámetros oscilan entre los 5 y los 20 centímetros. Los autores fotografiaron el hexágono cerca de Beartooth Butte, en Montana; la fotografía inferior fue tomada en las Montañas de San Juan, en la región sudoccidental de Colorado.

de adoptar configuraciones sumamente ordenadas. Excitada su curiosidad por la regularidad de las configuraciones, Nordenskjöld sugirió que la convección libre del agua a través del suelo poroso podría ser responsable de ciertas formas de suelo configurado.

Pero Nordenskjöld no acertaba a explicarse cómo podrían las células de convección reproducir figuras geométricas sobre la superficie del terreno. La verdad es que las teorías actuales siguen luchando con la cuestión. El modelo que hemos desarrollado a lo largo del decenio pasado proporciona una explicación plausible para las regularidades de ciertas formas de suelos configurados. Para poder comprender nuestro mecanismo, es preciso recordar primero cómo se produce la convección libre en el terreno.

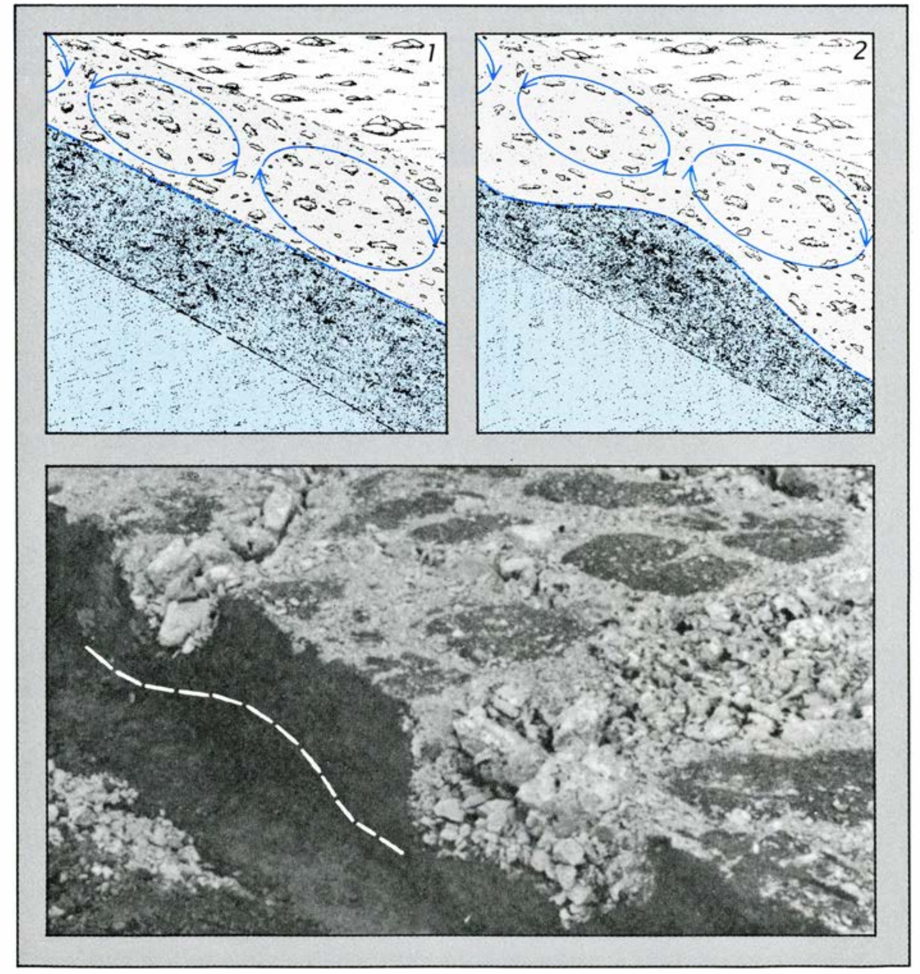
Se puede producir convección libre cuando el suelo helado se va descongelando. Durante el deshielo, el agua próxima a la superficie del suelo se calienta, mientras que el agua inmediata al frente de deshielo (la zona colindante entre el suelo helado y el descongelado) permanece fría. En casi todos los fluidos, ello supondría que el fluido más frío fuera más denso y permaneciera en el fondo, no produciéndose convección. El agua, sin embargo, no alcanza su máxima densidad en el punto de congelación, sino a cuatro grados centígrados, esto es, a cuatro grados por encima de su punto de congelación.

Por tanto, es posible la convección cuando el hielo está cubierto de agua más caliente. Tal es exactamente la situación al descongelarse el suelo. El agua más densa se hunde hacia el frente de deshielo, se enfría hasta cero grados y vuelve a subir, estableciendo así una serie de células continuamente circulantes.

Fue la imagen de las células de convección libre circulando sobre el frente de deshielo lo que nos hizo pensar en el mecanismo que proponemos. Razonamos que la convección habría de esculpir el terreno helado situado bajo la capa descongelada. Durante el deshielo, la pluma descendente de agua caliente fundiría el hielo subyacente y el agua fría ascendente retardaría la fusión. Así, el frente de deshielo adoptaría un perfil rugoso o acanalado, reflejo de la forma de la célula de convección. Sabemos ahora que pueden producirse acanaladuras importantes incluso en un solo deshielo.

Una vez impresa la configuración geométrica de la célula sobre el frente de deshielo, pueden participar otros

3. **FRANJAS RESIDUALES** en las Montañas Rocosas de Colorado. Es probable que hayan permanecido durmientes durante miles de años. La edad de estos residuos puede inferirse del crecimiento de los líquenes, por datación de carbono y por análisis del polen. Los autores han mostrado que las franjas, que se dan en terrenos en pendiente, aparecen al elongarse las células de convección libre que circulan en el suelo subyacente por efecto de la gravedad.



4. **LA CONVECCION LIBRE** determina la geometría de los terrenos configurados. Las células de convección de agua circulante (*flechas*) pueden generarse al deshelarse los suelos congelados (1); la forma de la célula está determinada por el carácter geológico de la región. El flujo de agua crea surcos y ondulaciones en el ''frente de deshielo'' (*la línea azul de trazos*), cuya forma refleja la de la célula (2). Otros procesos geofísicos, como el ''alzamiento'' por congelación, transfieren la configuración ondulada a la superficie del terreno. La zanja cortada a través de un polígono de piedras (*abajo*) revela que la configuración se extiende superficie abajo.



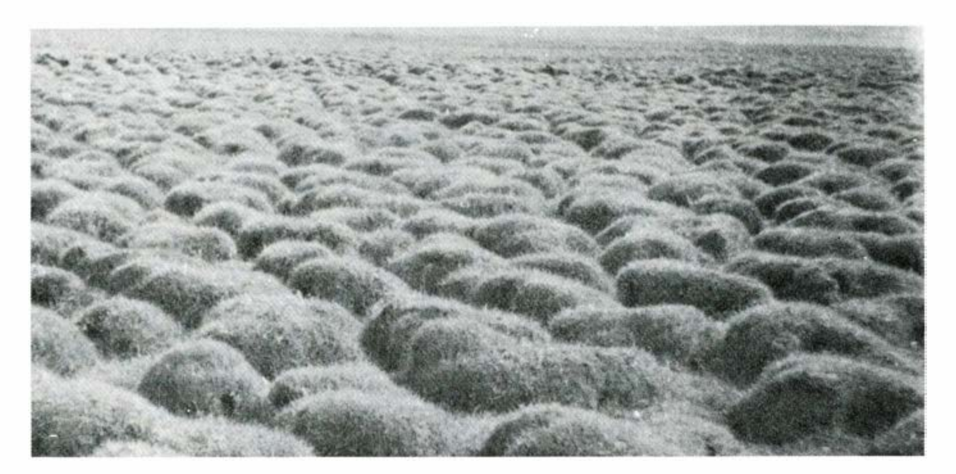
5. MOTIVOS SUBACUATICOS: solamente se dan allí donde el agua es lo bastante somera como para congelarse en el lecho del lago. Los dos lagos aquí mostrados se encuentran en las Montañas Anfiteatro de Alaska. La fotografía superior muestra pozos de piedras cerca de la ribera; la fotografía aérea de los polígonos de piedras revela que los motivos quedan confinados al perímetro somero del lago.

procesos geofísicos responsables de que tal configuración se reproduzca sobre la superficie del suelo. Por ejemplo, puede ocurrir que las piedras se vean empujadas hacia las acanaladuras del frente de deshielo, merced a la acción de la "congelación hacia arriba": la migración hacia arriba del frente de deshielo durante la congelación. Las piedras son izadas a la superficie por un fenómeno que muchos campesinos conocen: el alzamiento por congelación, causante de que en muchos campos "crezcan" piedras. Durante las heladas, las piedras se mueven hacia arriba, mientras que los "finos" del suelo ocupan y rellenan el hueco que las piedras dejan bajo sí, por lo que éstas no pueden retornar a la posición primitiva cuando el terreno se deshiela.

También se ha sospechado de la presión criostática como causante de la transferencia a la superficie de la configuración geométrica del frente de deshielo. Tal presión se genera durante la congelación, cuando el "frente de congelación" desciende y se aproxima al frente de deshielo, que presenta rugosidades y acanaladuras en las que puede quedar agua atrapada. La presión podría agrietar la superficie del terreno, o alzar el suelo en configuraciones que son reflejo de las acanaladuras subyacentes. Las piedras que quedan atrapadas en las grietas o que se reúnen en torno al suelo sobrealzado podrían reforzar la pauta; las grietas y el sobrealzado podrían producir asimismo variaciones del manto del terreno (como el crecimiento de vegetación o líquenes), por alternación de drenaje y exposición a la intemperie.

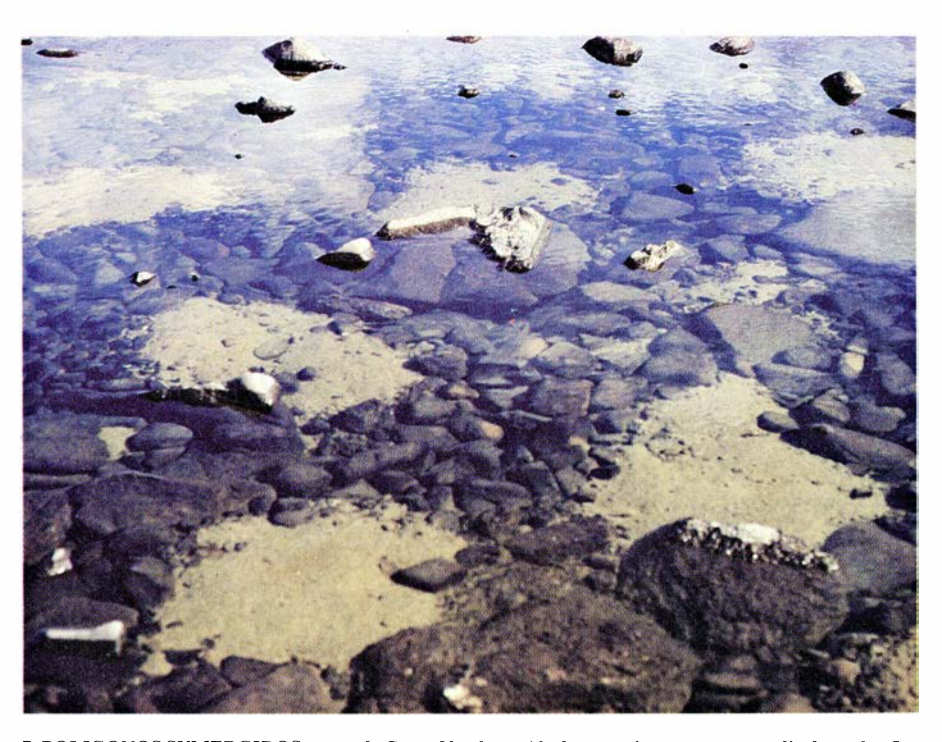
El grado en que participan estos y otros mecanismos en la transferencia a la superficie del terreno de las arrugas y acanaladuras de un frente de deshielo es activo objeto de investigación geomórfica. Entre tanto, hemos efectuado análisis matemáticos basados en el modelo de convección libre, análisis que predicen diversas formas de suelos configurados y que ponen de manifiesto que las franjas, círculos y otros perfiles poligonales podrían surgir por simple convección libre.

Nuestros análisis han alcanzado sus mejores éxitos en la descripción de terrenos configurados en formas poligonales o a franjas. Ponen cuantitativamente de manifiesto que la configuración hexagonal es la preferida en terrenos casi horizontales, lateralmente uniformes, donde resulta posible generar las células en una red continua. En aquellos suelos que presentan hetero-





6. LAS PAUTAS DE TOPOGRAFIA, como este campo de montículos, en Islandia (*arriba*), son probablemente los tipos más comunes de terrenos configurados en las regiones árticas y subárticas. Aunque queda mucho por conocer sobre la formación de pautas topográficas, la regularidad de los montículos y el hecho de que se elonguen y dibujen franjas en los terrenos en pendiente (*abajo*) sugiere la posibilidad de que la convección participe en su génesis.



7. POLIGONOS SUMERGIDOS, cerca de Crazy Notch, en Alaska, que tienen metro y medio de ancho. La configuración se obtiene cuando el agua asciende por el centro de una célula de convección libre. Las células que forman motivos sumergidos como éstos circulan por el interior del lecho del lago y se internan en el lago propiamente dicho.



geneidades (por ejemplo, variaciones en las propiedades del suelo) o barreras (como un lecho pétreo prominente), se intercalan entre los hexágonos otras formas geométricas.

El modelo de convección libre explica también la formación de los pozos de piedras, menos corrientes que los polígonos de piedras, y en cierto sentido, inversos de éstos. Mientras que los polígonos de piedra son resultado de que el frente de deshielo posea una estructura poligonal de depresiones y hondonadas interconectadas, los pozos de piedra revelan la existencia de una red de picos poligonales. Las células de convección libre que originan los polígonos de piedras circulan en sentido ascendente por el centro de la célula y descienden a lo largo de sus bordes; en cambio, los pozos de piedras reflejan una circulación descendente por el centro y ascendente por los bordes. Podemos predecir la dirección de la circulación basándonos en las propiedades del suelo.

Además, las predicciones de nuestro modelo son coherentes con la observación de que las configuraciones a franjas se presentan en terrenos en pendiente. En tales terrenos, el drenaje subsuperficial provocaría la aparición de células de convección con trayectorias de tipo cilíndrico o a modo de bobina helicoidal, que darían por resultado franjas. Las configuraciones sumergidas observables en lagos encajan también con nuestro modelo. Se forman solamente en cuerpos de aguas someras, donde la congelación se extiende hasta penetrar en el lecho del lago.

Nos hemos valido de nuestro modelo para predecir la razón entre la anchura del motivo y la profundidad de una capa descongelada, y hemos confirmado nuestras predicciones en medidas de campo. La anchura varía entre 3 y 5 veces la profundidad de la capa, dependiendo de la configuración del motivo. Las células de convección que generan polígonos subacuáticos circulan en el seno del lago propiamente dicho y, en consecuencia, como sería de esperar, la razón de la anchura del motivo a la profundidad de la capa deshelada es mayor que la observada en polígonos no sumergidos. Análogamente, los ciclos de deshielo estacional dan lugar a motivos de mayor tamaño que los producidos por ciclos diarios.

Hay varios campos en los que todavía es necesario verificar la aplicabili-

8. LOS POZOS DE PIEDRAS, menos comunes que los polígonos, se forman cuando el agua circula en sentido descendente por el centro de una célula poligonal de convección libre. Estos pozos noruegos miden alrededor de un metro de diámetro.

dad de nuestro modelo. Por ejemplo, estamos apenas comenzando a estudiar su aplicación a configuraciones definidas por topografía ordenada, que han sido un tanto despreciadas por los teóricos. Estamos asimismo investigando la capacidad del modelo para explicar la aparición de círculos de piedras, como los mostrados al principio de este artículo. Otro modelo de convección, que supone la circulación del suelo propiamente dicho en vez de la circulación del agua a través del mismo, ha sido utilizado por Bernard Hallet, de la Universidad de Washington, en el caso de los círculos de piedras. Sus consecuencias no son dispares de las deducidas de nuestro modelo.

Hasta el presente, estos análisis del suelo configurado no llegan a proporcionar una descripción paso a paso de su formación. Nuestros esfuerzos, empero, tienen el incesante acicateado de las múltiples recompensas que tales investigaciones prometen. Las configuraciones residuales podrían proporcionarnos indicios sobre el clima en tiempos prehistóricos. Las configuraciones activas podrían servir de testigos para supervisar el impacto de la humanidad sobre las regiones polares. Los estudios de terrenos helados efectuados en la Tierra han contribuido ya a iluminar la historia de las condiciones climáticas en Marte, donde las imágenes de las sondas espaciales han revelado surcos anulares, fracturas poligonales y pautas hielo-terreno.

Incluso en la hipótesis de que llegara a establecerse una teoría completa de la formación de terrenos configurados, no es probable que el tema resultara menos fascinante. La maravilla de los terrenos configurados no reside tanto en saber cómo se producen, cuanto en el hecho mismo de que lleguen a producirse. Otro tanto vale para la conocida regularidad de los copos de nieve. En ningún fenómeno que conjuguen la precisión de la geometría con los caprichos del azar faltará un elemento de misterio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GEOCRYOLOGY, A. L. Washburn, John Wiley & Sons, Inc., 1980.

A MODEL FOR SORTED PATTERNED GROUND REGULARITY. R. J. Ray, W. B. Krantz, T. N. Caine y R. D. Gunn en *Journal of Glaciology*, vol. 29, n.º 102, págs. 317-387; 1988.

GEOMETRICAL ASPECTS OF SORTED PATTERNED GROUND IN RECURRENTLY FROZEN SOIL. Kevin J. Gleason, William B. Krentz, Nelson Caine, John H. George y Robert D. Gunn en *Science*, vol. 232, n.º 4747, págs. 216-220; 11 de abril de 1986.

La fecundación en los mamíferos

Los fenómenos que preceden y siguen a la fusión del espermatozoide con el óvulo tienen que ocurrir en una secuencia precisa. En el curso de este proceso interviene, de forma destacada, una molécula singular

Paul M. Wassarman

Han transcurrido más de cien años desde que Hermann Fol, un perspicaz zoólogo suizo, lograra, mediante su microscopio, ver cómo un espermatozoide penetraba en un óvulo y lo fecundaba, para formar la primera célula de un nuevo embrión. De entonces acá, muchas de las etapas que constituyen el proceso de la fecundación —la serie de sucesos que tienen lugar, en un orden estrictamente obligado, desde el contacto inicial del espermatozoide y el óvulo hasta la fusión de ambos—, así como los que acontecen inmediatamente después de ella, han sido objeto de atención preferente por parte de los biólogos.

Al igual que Fol, que observó la fecundación de un óvulo de una estrella de mar, los primeros investigadores centraron sus estudios en los invertebrados marinos. La razón principal de esto estribaba en que los óvulos de tales organismos (en contraste con los óvulos de los mamíferos) son fecundados fuera de la hembra (en el agua del mar) bajo condiciones que pueden recrearse con facilidad en el laboratorio [véase "El proceso de la fecundación" por David Epel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1978]. Desde finales de la década de los 50 se han preparado y perfeccionado sistemas de cultivo con los que se logra, *in vitro*, la fecundación y las primeras fases de desarrollo de los óvulos de mamíferos, y con los que se hace posible el estudio de las interacciones espermatozoide-óvulo con bastante detalle.

Esas investigaciones han aclarado no sólo los sucesos fundamentales de la fecundación en los mamíferos, sino también los mecanismos moleculares subyacentes. Mis colegas y yo, recientemente, hemos identificado y caracterizado la molécula específica que, en la capa externa del óvulo de ratona, funciona como receptora del espermatozoide. También hemos descubierto que esta molécula receptora desempeña otros papeles críticos en el decurso de la fecundación y en los fenómenos que inmediatamente le siguen. Los estudios sobre esta molécula receptora, otras moléculas implicadas en el proceso de fecundación del ratón y moléculas análogas en otros mamíferos, pueden facilitar en el futuro estudios bioquímicos sobre la reproducción humana. Dichos estudios podrían llevar a nuevos métodos, tanto para evitar la concepción (contracepción), como para el tratamiento de la esterilidad en los seres humanos.

Aun cuando nos hayamos concentrado en el trabajo con ratones (dado que no hay óvulos humanos disponibles en cantidades que se requieren para estudios moleculares), su modelo de fecundación es completamente similar al de la especie humana y al de otros mamíferos. El proceso fundamental comienza cuando muchos espermatozoides quedan, al principio laxamente adheridos y más tarde tenazmente pegados a receptores, sobre la superficie de la gruesa corteza (córtex) o capa externa ovular, llamada zona pelúcida (*zona pellucida*). Cada espermatozoide, que tiene en su superficie un gran número de proteínas óvulo-adherentes, se pega a muchos receptores espermáticos sobre el óvulo. Más exactamente, cada punto de engarce de cada proteína óvulo-adherente encaja con su punto de engarce complementario sito en el receptor espermático, del mismo modo que cada llave ajusta en su cerradura.

Generalmente la unión de un espermatozoide sobre un óvulo presenta la así llamada especificidad específica que, en nuestro contexto, significa que los receptores espermáticos que posee el óvulo reconocen sólo a espermatozoides de la misma especie y rechazan a todos los demás. Esa capacidad de los gametos, o células sexuales, masculinas y femeninas, dentro de la misma especie, para su reconocimiento mutuo, es característica del proceso de fecundación de todos los organismos, vegetales y animales, extendida por doquier. Y hay buenas razones para ello. Los estudios experimentales han puesto de manifiesto que, con unas pocas excepciones notables (tales como los embriones de mulos y burdéganos, que se originan por cruzamiento de las especies caballo-asno), los embriones producidos por fecundación interespecífica no se pueden desarrollar normalmente.

La unión del espermatozoide a la zona pelúcida va seguida de lo que se llama reacción acrosómica del espermatozoide adherido. El acrosoma es un orgánulo rico en enzimas digestivas, que está situado en la región anterior de la cabeza del espermatozoide, exactamente bajo la membrana plasmática que envuelve esa cabeza. Durante la reacción los dos tercios, más o menos, que están frente a dicha membrana plasmática, se unen con la capa externa de la membrana del acrosoma. En esta fusión se forman microvesículas, que constan de la membrana plasmática del espermatozoide y de la membrana acrosómica externa. Estas vesículas híbridas terminan siendo expulsadas, con lo que la zona pelúcida queda expuesta

PAUL M. WASSARMAN es director del departamento de biología celular y del desarrollo en el Instituto Roche de Biología Molecular en Nutley, N. J. Después de alcanzar su doctorado en bioquímica por la Universidad de Brandeis en 1968, pasó dos años, pensionado por la Fundación Helen Hay Whitney, en el laboratorio de biología molecular del Consejo de Investigaciones Médicas en Cambridge, Inglaterra. Se incorporó luego a la facultad de medicina de la Universidad de Purdue antes de pasar, en 1972, a la facultad de medicina de Harvard, en donde inició sus investigaciones sobre el desarrollo de los mamíferos. Wassarman dejó Harvard en 1985 para acceder a su destino actual.

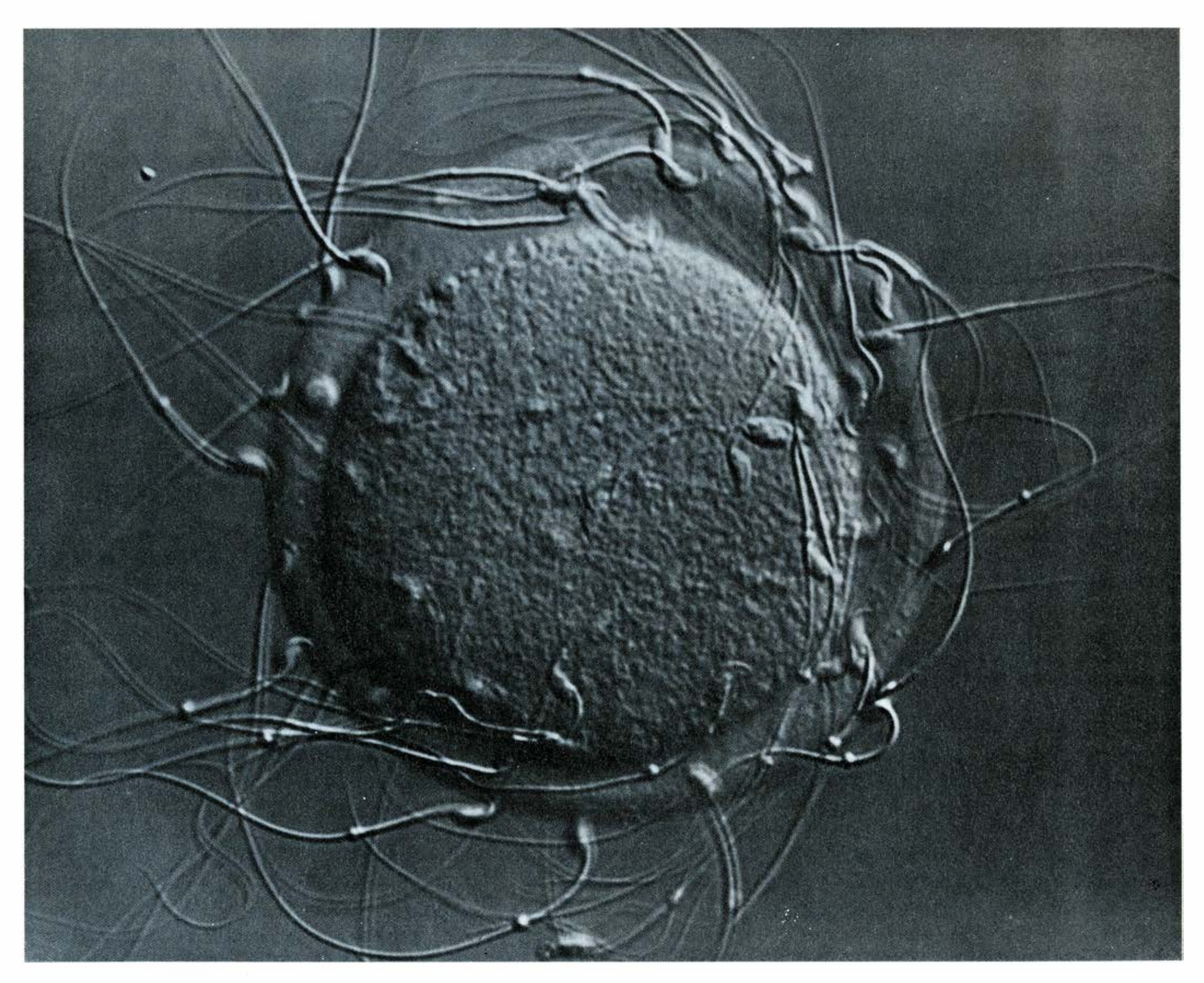
a la capa interna de la membrana del acrosoma y a las enzimas de éste. Estimulado por las enzimas, que digieren la zona pelúcida, el espermatozoide acrosómico-reactivo perfora, entonces, la cubierta externa ovular.

Uno de los espermatozoides, entre la multitud de los que avanzan, alcanza el espacio perivitelino, estrecha región entre la zona pelúcida y la membrana plasmática del óvulo, se fusiona con esa membrana y fecunda al óvulo: el material genético del parental masculino se mezcla con el del parental femenino, para iniciar el desarrollo del embrión resultante. La fusión desencadena también una serie de reacciones que, en pocos segundos, alteran la membrana plasmática, y, al cabo de pocos minutos, alteran asimismo la zona pelúcida, en lo que se llama zona de reacción. Con ello, tanto la membrana plasmática como la cubierta ovular externa se vuelven refractarias para otros espermatozoides. Estos cambios son cruciales para evitar una situación que lleva a la muerte, denominada polispermia: la fusión de más de un espermatozoide con un único óvulo.

Curiosamente, la zona pelúcida se ha considerado, a veces, por los investigadores como un estorbo, a modo de barrera para los espermatozoides, y, por tanto, como un impedimento para la fecundación; a menudo, en los experimentos con óvulos de mamíferos, éstos han sido despojados de ella. Ahora ha quedado aclarado que tal envuelta funciona como un sistema de seguridad de gran finura, que puede diferenciar los espermatozoides que llegan, para seleccionar únicamente a los compatibles con la fecundación y el desarrollo, prepara al espermatozoide para la fusión con el óvulo y, posteriormente, protege al embrión resultante contra la polispermia o fecundación múltiple.

Cuando mis colegas y yo empezamos a estudiar la fecundación en los mamíferos, hace más o menos una década, aparecían, entre algunas de las más importantes preguntas sin respuesta, las siguientes: ¿cuál es la naturaleza del supuesto receptor espermático en la zona pelúcida? ¿Qué es lo que inicia la reacción acrosómica, con la que continúa la adhesión del espermatozoide al óvulo? ¿Qué cambios bioquímicos ocurren, después de la fecundación, para que la zona pelúcida se haga refractaria a los espermatozoides restantes? Ha resultado que una glucoproteína única —un polipéptido, o cadena de aminoácidos, que lleva unidos grupos de azúcares— constituye parte de la respuesta a las tres cuestiones.

Pasamos a estudiar la zona pelúcida

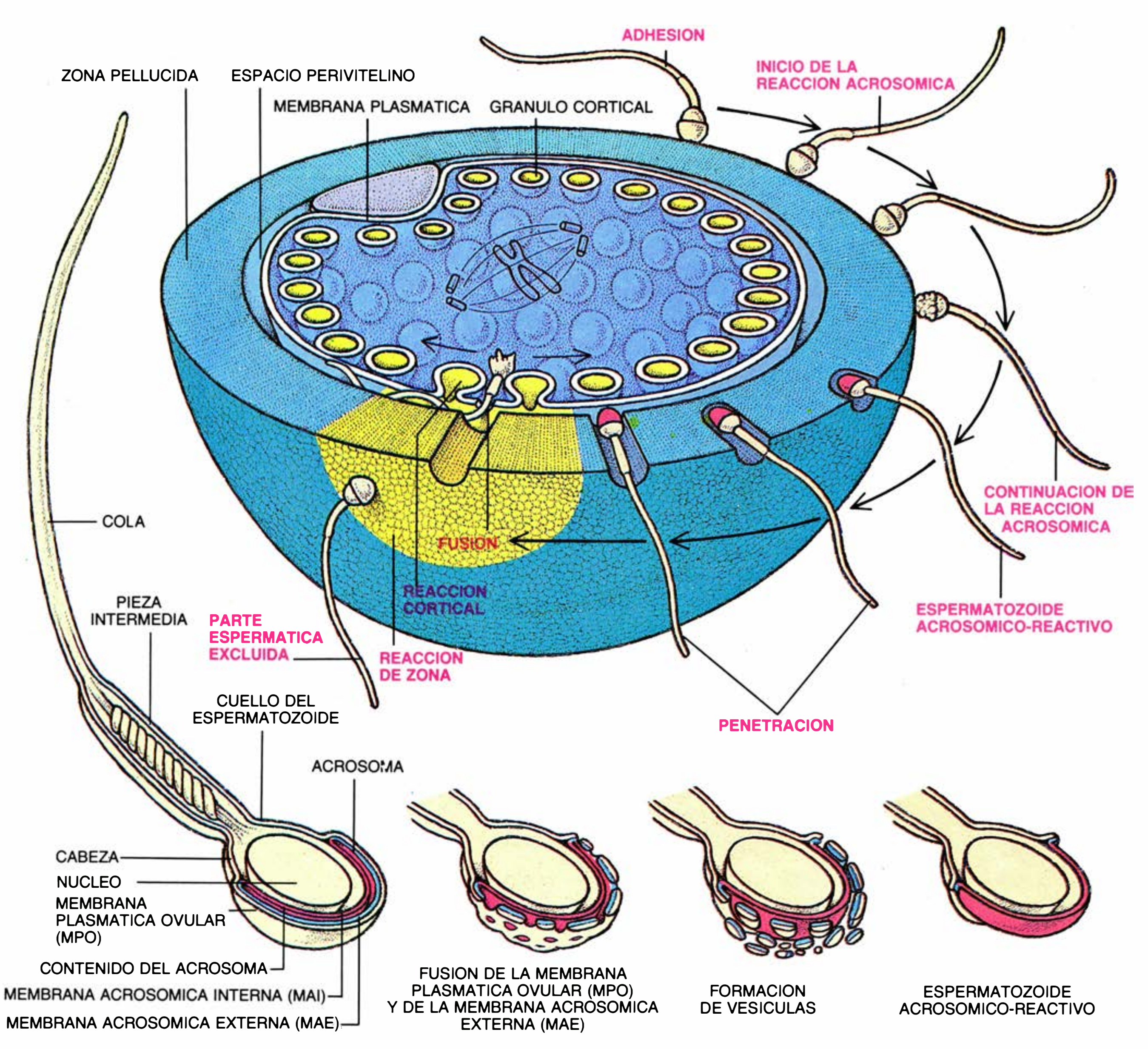


1. EN LA *ZONA PELLUCIDA*, o cubierta externa del óvulo, pueden adherirse y penetrar muchos espermatozoides, pero sólo uno llegará, en su caso, a unirse con la fina membrana plasmática que rodea al óvulo propiamente dicho (*esfera interna*), lo fecundará y originará el nuevo embrión. Con estudios recientes en el ratón acometidos en mi laboratorio y en otros, se han empezado a dilucidar los mecanismos moleculares subyacentes en la serie de sucesos constitutivos de la fecundación en los mamíferos. Ovulo y espermatozoide de ratón se han ampliado unos 1000 diámetros en esta microfotografía del autor del artículo.

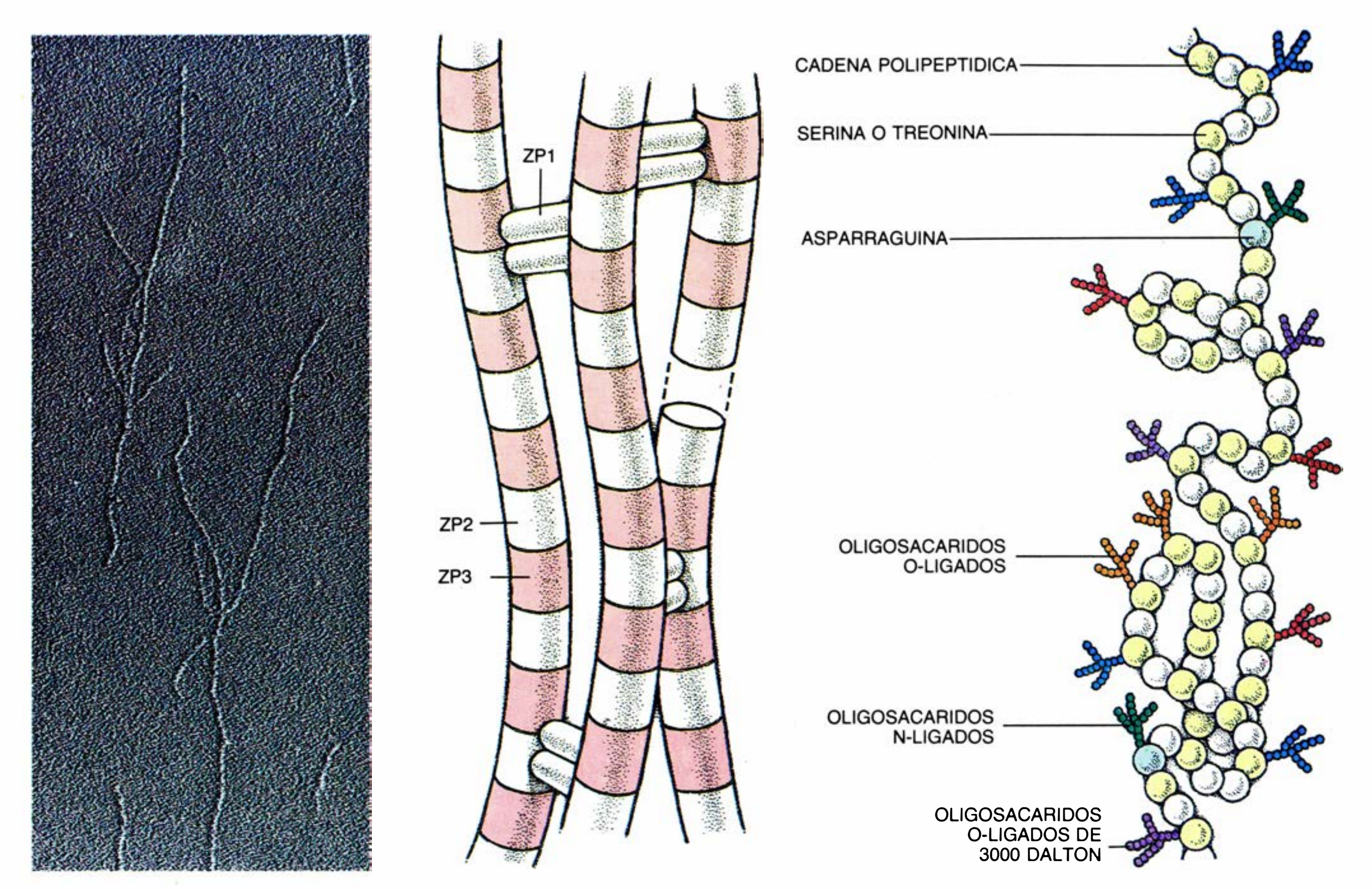
de manera indirecta. En el curso de una investigación sobre el desarrollo del ratón, intentamos la identificación de genes —represores o efectores—, que actuaran sólo durante el crecimiento de los oocitos, las células madre de los óvulos. Entre los genes que gobiernan la producción de las proteínas de la zona pelúcida era de esperar que encontráramos los más prometedores candidatos al respecto, pero necesitábamos aislar dichas proteínas antes de poder identificar los genes correspondientes.

Jeffrey D. Bleil, por entonces doctorando en mi laboratorio de la facultad de medicina de Harvard, y yo, descubrimos que la zona pelúcida en el ratón constaba de tres glucoproteínas diferentes. Las denominadas ZP1, ZP2 y ZP3. Sabíamos poco de su estructura química, pero sí logramos diferenciarlas mediante electroforesis sobre gelatina, una técnica estándar que separa moléculas en razón de su peso molecular. Dado que las ZP1, ZP2 y ZP3, que, respectivamente, pesan en unidades dalton 200.000, 120.000 y 83.000, son sintetizadas y segregadas por los oocitos en crecimiento, se reúnen para formar una cubierta porosa, que crece hasta un espesor de unas siete micras (milésimas de milímetro). (La cubierta del óvulo humano es casi el doble de gruesa y la de otros óvulos de mamíferos puede alcanzar un espesor cuatro o cinco veces mayor.)

En cierto modo quedamos sorprendidos de esa composición tan simple de la zona pelúcida del óvulo de ratona. Al fin y al cabo casi todas las células de mamífero quedan envueltas por una matriz extracelular, que es marcadamente más compleja y lleva muchas proteínas diferentes. Pero nuestros hallazgos resultaron confirmados, posteriormente, por nuevos datos de que las zonas pelúcidas (*zonae pellucidae*) en todos los mamíferos estudiados, incluida la especie humana,



2. EL PROCESO DE FECUNDACION comprende varias etapas. Una vez que el espermatozoide o célula espermática se une a la *zona pellucida* tiene lugar la llamada reacción acrosómica. La membrana externa del acrosoma (*en verde oscuro*), orgánulo rico en enzimas, y situado en la parte anterior de la cabeza del espermatozoide, se fusiona en muchos puntos con la membrana plasmática que rodea dicha cabeza. Después, ambas membranas adosadas (*en verde claro*) forman vesículas que, finalmente, son expulsadas y liberan enzimas acrosómicas (*en rojo*); las enzimas abren una vía de penetración en la *zona pellucida*, lo cual permite el avance del espermatozoide. Por fin, el espermatozoide se une a la membrana plasmática del óvulo, y se fusiona con ella, para fecundarlo. El proceso culmina con las reacciones producidas entre corteza y *zona pellucida*. Primeramente, gránulos corticales del citoplasma ovular, ricos en enzimas, sueltan su contenido (*en amarillo*) dentro de la *zona pellucida*, comenzando por el punto de fusión y progresando a derecha e izquierda. Después, en la zona reaccionante, las enzimas modifican la *zona pellucida*, hasta transformarla en una barrera impenetrable a los espermatozoides, como defensa contra la polispermia.



3. MOLECULA ZP3, un componente principal de los filamentos (*izquierda*) que se asocian para formar la *zona pellucida*. ZP3 es una glucoproteína: un polipéptido al que se unen grupos glucídicos. Se combina con otra glucoproteína, ZP2, para formar los sillares de los filamentos, que aquí están dibujados, en el centro, de manera esquemática; una tercera glucoproteína, ZP1, une los filamentos. La molécula ZP3, que se muestra a la derecha, es la receptora que fija los espermatozoides; también induce la reacción acrosómica. Los elementos de unión efectivos son un conjunto de las cadenas de azúcar, como salientes radiantes del eje esquelético polipeptídico de la ZP3; son oligosacáridos con uniones de oxígeno, unidos a los aminoácidos serina y treonina, con un peso molecular en torno a los 3900 dalton. Parece ser que las mismas cadenas de azúcar son las que colaboran con el polipéptido en la ZP3, para inducir la reacción acrosómica.

constan también de unas pocas glucoproteínas.

La citada simplicidad nos indicó otra dirección de estudio. Verosímilmente una de las tres glucoproteínas de la zona pelúcida, en la ratona, actuaba como receptor espermático y podríamos identificarla. Sin embargo, primero había que demostrar que, en efecto, la zona pelúcida contenía receptores espermáticos.

Pasamos a lo que se llama prueba de competitividad. A partir de óvulos sin fecundar, aislamos zonas pelúcidas y disolvimos el material en una solución ligeramente acidificada, de tal modo que todas las glucoproteínas de cada cubierta, no sólo las de la capa externa del óvulo, pudieran reaccionar libremente con los espermatozoides. Luego neutralizamos la disolución de zonas pelúcidas y añadimos espermatozoides de ratón en una placa de prueba, removimos bien el esperma y lo incubamos con los óvulos no fecundados, bajo condiciones conocidas, que permitieran, *in vitro*, tanto la fecundación como el desarrollo.

Supusimos que, si la disolución de zonas pelúcidas contenía receptores espermáticos, éstos y las proteínas óvulo-adherentes del espermatozoide podrían reaccionar entre sí y unirse para formar complejos moleculares. La formación de estos complejos impediría, entonces, la acción de las proteínas óvulo-adherentes sobre las zonas pelúcidas de los óvulos no fecundados, en la última etapa de la prueba, y, por tanto, los espermatozoides tratados no llegarían a adherirse a los óvulos, ni a fecundarlos. En otras palabras, los receptores libres disueltos podrían competir con éxito con los receptores espermáticos de los óvulos. Por otra parte, si la disolución no contenía receptores, los espermatozoides no quedarían afectados por el tratamiento con la solución de zonas pelúcidas, y podrían unirse y fecundar a los óvulos normalmente.

Descubrimos que los espermatozoides tratados no podían adherirse a los óvulos, o fecundarlos; se demostró así que la zona pelúcida de los óvulos de ratona contenía receptores espermáticos. Por otra parte, los preparados de zonas pelúcidas solubilizadas, obtenidas, no de óvulos sin fecundar sino de embriones todavía unicelulares, no impedían la adherencia de los espermatozoides ni la fecundación, prueba de que la cubierta de esos embriones carecía de receptores espermáticos competentes. Este último hallazgo está en concordancia con el hecho de que los espermatozoides no pueden unirse a un óvulo fecundado (embrión unicelular), ni perforar su cubierta. Lo que también sugiere, al menos parcialmente, que la razón por la cual la zona pelúcida se hace refractaria a los espermatozoides después de la fecundación es que ésta provoca una modificación de los receptores espermáticos del óvulo —modificación que destruye su capacidad de unión con las proteínas óvulo-adherentes del espermatozoide.

Comprobado que la zona pelúcida contenía receptores espermáticos, intentamos saber cuál de las tres glucoproteínas servía como receptora y qué cambios en su molécula la incapacitaban para el reconocimiento de espermatozoides. Dimos muy pronto con la respuesta a la primera cuestión. Purificamos las glucoproteínas ZP1, ZP2 y ZP3, tanto de óvulos sin fecundar como de embriones unicelulares, e hicimos con cada una de ellas la correspondien-

te prueba de competitividad. Esto puso de manifiesto que la unión de los espermatozoides con los óvulos sólo quedaba inhibida cuando los espermatozoides eran tratados mediante la ZP3 purificada, procedente de zonas pelúcidas. No ejercían ningún efecto, ni las glucoproteínas ZP1 y ZP2, ya de óvulos, ya de embriones, ni tampoco la ZP3 procedente de embriones. Aún más, en la inhibición de la adherencia resultó tan eficaz la ZP3 ovular purificada cuanto los preparados mismos de zona pelúcida, señal de que la ZP3 había sido la responsable de la inhibición en las pruebas originales de competitividad. La ZP3 mostraba ser la receptora espermática.

Cuando comparamos, mediante electroforesis sobre gelatina, la ZP3 procedente de óvulos no fecundados con la procedente de embriones, observamos que las dos moléculas —una receptora activa, la otra inactiva— eran indistinguibles. Estaba claro que, para que se produjera la inactivación del receptor, después de la fecundación, debía darse algún cambio químico muy sutil de ese receptor. Teníamos que conocer mejor la composición, para llegar a comprender cómo acontecía la inactivación.

Esto llevaría algún tiempo. Mientras tanto, continuamos con otras pesquisas. Entre éstas se incluía una prueba adicional de que la ZP3 era la receptora espermática. También esperábamos determinar si la ZP3 intervenía en la reacción acrosómica. En un estudio para evaluar el papel de la ZP3 como molécula receptora, contábamos con ciertos descubrimientos realizados en nuestro propio laboratorio, en Harvard, así como por los de Bayard T. Storey y sus colaboradores en la Universidad de Pennsylvania: sólo pueden adherirse a la cubierta externa del óvulo los espermatozoides con un acrosoma intacto, y sólo los espermatozoides acrosómico-reactivos pueden llevar a cabo el paso siguiente, la perforación de la cubierta.

Estos descubrimientos nos permitieron suponer que si la ZP3 era un receptor espermático sólo reconocería espermatozoides de acrosoma intacto, y no los de acrosoma sujeto a reacción, cuando se mezclara con espermatozoides en una placa de laboratorio. Por otra parte, sólo reconocería la cabeza del espermatozoide, cuando tuviera lugar su adhesión sobre la zona pelúcida; no reconocería, ni la pieza intermedia, ni la cola.

Se evaluó, mediante autorradiografía, la capacidad de la ZP3 para distinguir entre espermatozoides con acrosoma intacto y los acrosómico-reactivos, y entre diferentes regiones espermáticas. Marcamos ZP3 purificada con un isótopo radiactivo; después, registramos, sobre película, la emisión de radiactividad de las moléculas. Las autorradiografías resultantes indicaban que la ZP3 marcada ofrecía el comportamiento esperado, y se unía sólo a espermatozoides con acrosoma intacto, y únicamente a las cabezas. Estos experimentos nos permitieron también hacer la estimación de que cada acrosoma intacto podía unirse a unas 10.000 a 50.000 moléculas de ZP3. Dada la extraordinaria movilidad de los espermatozoides de mamíferos, habrá que suponer que se necesitan decenas de miles de receptores en la zona pelúcida intacta, para unir cada célula espermática a su superficie.

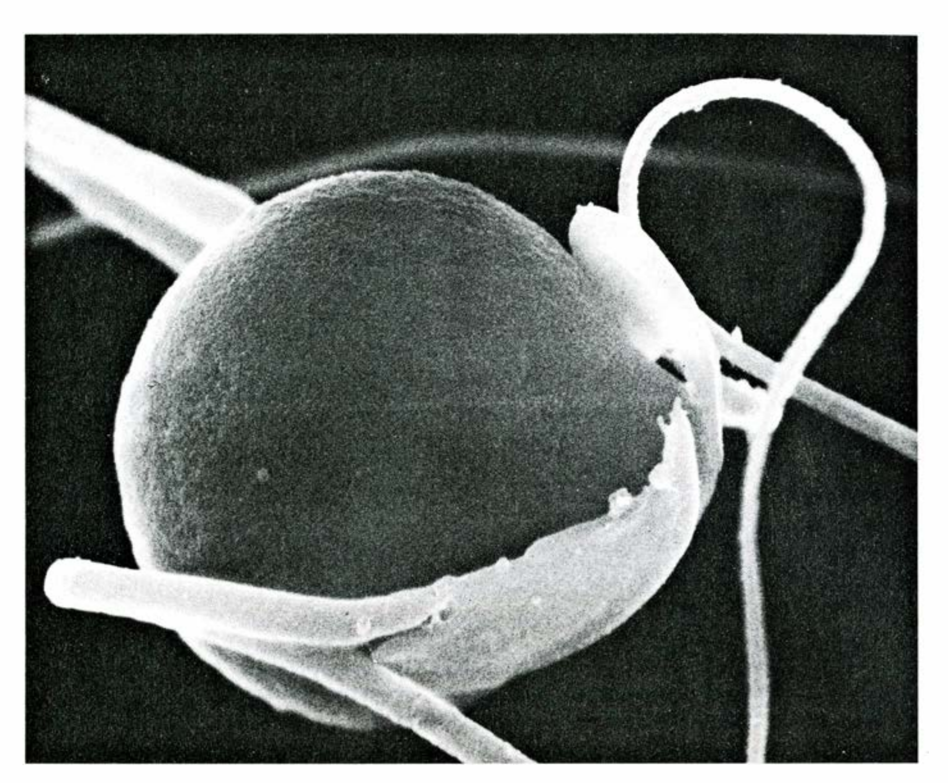
Bleil y yo también colaboramos para dilucidar el mecanismo mediante el cual se inducía la reacción acrosómica. Era muy posible que una glucoproteína de la zona pelúcida, que no fuera la ZP3, esto es, las ZP1 o ZP2, indujera la reacción, después de producida la unión inicial del espermatozoide a la ZP3. Por tanto, combinamos espermatozoides de acrosoma intacto con cada una de las glucoproteínas de la zona pelúcida, obtenidas de óvulos de ratona, y observamos los efectos sobre el espermatozoide. Sólo la ZP3 purificada, procedente de zonas pelúcidas ovulares, era capaz, *in vitro*, de inducir la reacción acrosómica, lo que ponía de manifiesto que esa ZP3 era el inductor natural. No inducían la reacción, ni las ZP1 y ZP2, ya de óvulos o de embriones, ni la ZP3 procedente de embriones. Al parecer, la ZP3 pierde su capacidad para inducir la reacción acrosómica después de la fecundación, precisamente cuando pierde su capacidad para adherirse a espermatozoides. Todavía no se ha aclarado, en sus pormenores, de qué manera la unión de espermatozoides con la ZP3 induce la reacción acrosómica. Algunas pruebas avalan la posibilidad de que la unión haga más permeable, a los iones calcio, la membrana plasmática del espermatozoide y la posibilidad de que dicho cambio facilite la fusión de las membranas plasmática y acrosómica.

El descubrimiento de la doble función de la ZP3 —unión espermática e inducción de la reacción acrosómica— nos sorprendió gratamente. El caso es completamente distinto en los erizos de

4. LA PRUEBA DE COMPETITIVIDAD contribuyó a demostrar que la ZP3 de la *zona pellucida* era el receptor espermático en la ratona. Cuando en una placa de laboratorio se exponen espermatozoides a óvulos no fecundados (*arriba*), las proteínas óvulo-adherentes del espermatozoide se unen a los receptores espermáticos de los óvulos y sobreviene la fecundación. En la prueba de competitividad (*abajo*), los espermatozoides son incubados, en primer lugar, con supuestos receptores espermáticos. Si existen receptores, los espermatozoides se unen a ellos; como ahora las proteínas óvulo-adherentes están bloqueadas, los espermatozoides ya no pueden unirse a los óvulos y fecundarlos. Si no hay receptores, los espermatozoides no quedan afectados y fecundan a los óvulos. En la prueba de competitividad la ZP3, aislada a partir de óvulos no fecundados, impide que los espermatozoides interactúen con óvulos de ratona. (Dibujos de Neil O. Hardy.)

mar y otros invertebrados marinos, en los que estas funciones se reparten entre dos moléculas diferentes. En esos organismos, los óvulos presentan dos cubiertas exteriores: una gruesa, gelatinosa, por fuera, y otra, mucho más fina, por dentro, la envuelta vitelina. Una molécula glucídica en la capa gelatinosa induce la reacción acrosómica, mientras que una glucoproteína, en la envuelta vitelina, es la responsable de la unión con especificidad específica.

El saber que la ZP3 puede actuar en la unión espermática y en la inducción de la reacción acrosómica no sirve para explicar cómo lo hace. Esto nos llevó a otro estudio más amplio, si bien mis colegas y yo deseábamos ahondar más en la distribución de la ZP3 por la zona pelúcida. Pretendíamos, en particular, determinar si la superficie de la cubierta exhibía suficientes moléculas de ZP3 como para hacer posible las decenas de millares de interacciones, que suponíamos que eran necesarias para fijar a cada espermatozoide en su lugar.



5. ESPERMATOZOIDE estrechamente adherido a una bola de vidrio, cubierta con ZP3 de óvulo de ratona. Este hallazgo, unido al de que ni la ZP1 ni la ZP2, ni otras glucoproteínas, provocan esa unión, proporciona la prueba más importante de que la ZP3 es la receptora espermática en los ratones. La microfotografía, con microscopio de barrido, fue tomada por David M. Phillips, con material preparado por Mónica H. Vázquez.

Jeffrey M. Greve, por entonces vinculado a mi laboratorio de Harvard, y yo establecimos que la zona pelúcida constaba de largos filamentos interconectados, dotado cada uno de un grosor de unos 7 nanómetros (millonésimas de milímetro). Posteriormente, en el Instituto Roche de Biología Molecular en Nutley, Greve y yo determinamos que el sillar fundamental de los filamentos era una unidad compuesta de una molécula ZP2 y otra ZP3, y que dicha unidad se repetía, a menudo cientos de veces, en cada filamento. Los filamentos de la zona pelúcida se hallan conectados entre sí por ZP1, que consta de dos cadenas polipeptídicas idénticas, unidas por puentes disulfuro. Esta arquitectura filamentosa sitúa en la superficie de la zona pelúcida a decenas de millones de moléculas ZP3, más que suficientes para la unión tenacísima de un ejército de células espermáticas.

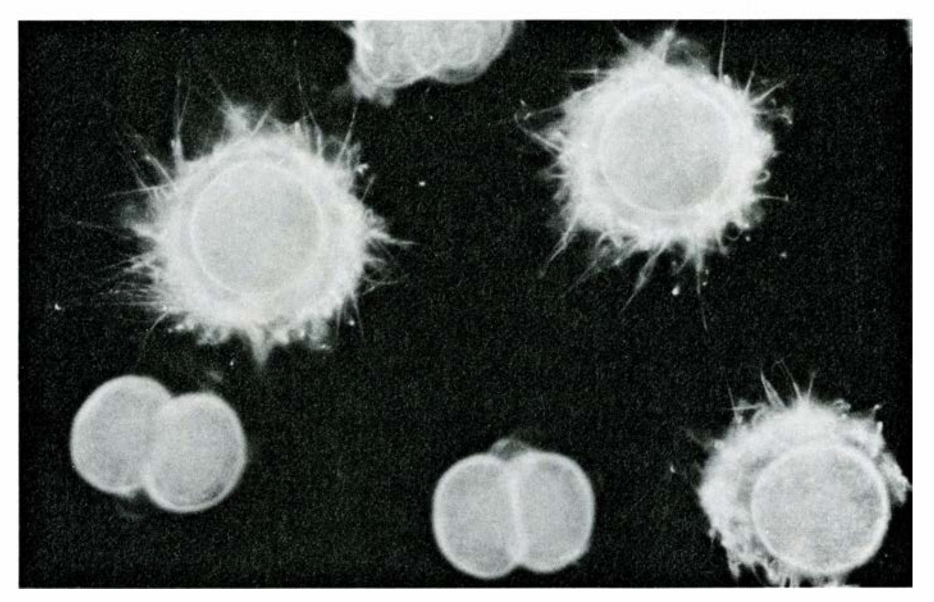
La investigación de las interacciones moleculares que permiten a la ZP3 unirse al espermatozoide, e iniciar la reacción acrosómica, comenzó con el análisis previo de la acción química de la molécula. Estos estudios fueron llevados a cabo, en mi laboratorio de Harvard, por Greve y otros dos de mis doctorandos, Richard J. Roller y George S. Salzmann. En este trabajo no podíamos distinguir, de modo inmediato, qué características eran importantes para la función receptora y cuáles no lo eran, pero nos dio una base firme para posteriores estudios.

Averiguamos que la cadena polipeptídica de la ZP3 constaba de unos 400 aminoácidos. Como ramas salientes de esa cadena polipeptídica hay muchas cadenas de oligosacáridos, cadenas cortas de azúcares sencillos. Tres o cuatro son oligosacáridos N-ligados, lo que significa que están unidos a un átomo de nitrógeno, sobre el aminoácido asparraguina. Un número indeterminado, aunque bastante alto, eran oligosacáridos O-ligados, enlazados a un átomo de oxígeno sobre uno de los dos aminoácidos, serina o treonina. Los oligosacáridos se presentan en muchas variedades, y en cada molécula de ZP3 no se dan las mismas secuencias de cadenas de azúcares.

Poco después de que Harvey M. Florman llegara a mi laboratorio en Harvard, como becario postdoctoral, nos pusimos a trabajar para determinar si eran las cadenas de polipéptidos o las de polisacáridos, o ambas, las responsables de la actividad espermático-receptora de la ZP3. En muchos ejemplos de interacciones receptoras, la estructura tridimensional del receptor, que es a menudo una proteína, resulta decisiva para su capacidad de unión con una proteína complementaria. No conocíamos la conformación de la ZP3, pero sabíamos cómo alterarla, y al hacer esto podría determinarse si lo importante, en su capacidad de interacción con la proteína óvulo-adherente sobre el espermatozoide de ratón, era la forma de la ZP3.

Nos encontramos con que el exponer la ZP3 a agentes que desplegaban su esqueleto polipeptídico (estructura plegada-no plegada), no ejercía influencia sobre la unión espermática, lo que implicaba que la conformación de la ZP3 no era un factor importante al respecto. Para confirmar esto, cortamos moléculas de ZP3 en pequeños glucopéptidos mediante pronasa, enzima totalmente indiferente ante la elección de los puntos de cortadura. Después volvimos a nuestras pruebas de competitividad, y mezclamos espermatozoides con toda la colección de glucopéptidos, para exponer ese esperma así tratado a óvulos no fecundados. Por lo que respecta a impedir la unión de espermatozoides y óvulos, los glucopéptidos pequeños mostraban la eficacia de la ZP3 intacta, cuyo resultado elimina, virtualmente, la posibilidad de que se requiera una conformación específica para la actividad espermático-receptora de la ZP3.

El hecho de que la conformación de la ZP3 no revista importancia para la adherencia indica que la cadena polipeptídica, probablemente, no proporciona el sitio de unión. Para confirmar esto, tratamos la ZP3 con ácido trifluo-



6. EL EFECTO DE LA REACCION DE ZONA resulta espectacularmente demostrativo en esta microfotografía, en campo oscuro, tomada por el autor. Los espermatozoides se adosan a óvulos no fecundados (*en masas apelotonadas*), pero no a un embrión en fase bicelular. Es muy verosímil que la ZP3 esté implicada en la reacción de zona. Las enzimas corticales liberadas en la *zona pellucida* alteran las moléculas de ZP3, de tal manera que si ellas antes actuaban como receptoras ahora rechazan a los espermatozoides.

rometansulfónico, reactivo que elimina de las cadenas polipeptídicas tanto los oligosacáridos N-ligados como los O-ligados; entonces, mediante la prueba de competitividad, ensayamos, sobre la cadena desnuda, la actividad espermático-receptora. Tal como se esperaba, la exposición de espermatozoides a la proteína sola no tenía efecto sobre la unión de los espermatozoides a los óvulos: los polipéptidos no poseen, de suyo, actividad espermático-receptora detectable.

En pruebas similares separamos los oligosacáridos N-ligados de la ZP3, mediante endoglucosidasa F, enzima que deja intactas las cadenas de glúcidos O-ligadas. Esta forma modificada de la ZP3 conserva la actividad espermático-receptora. El hallazgo implicaba, muy firmemente, que los oligosacáridos O-ligados constituían la parte principal de la ZP3 del ratón en la adhesión espermática sobre zonas pelúcidas. Cuando, por otra parte, separamos los oligosacáridos O-ligados con un álcali débil, la molécula alterada no mostró actividad espermático-receptora. Y aún más, la exposición de espermatozoides ante pequeñas concentraciones de azúcares O-ligados —separados de la ZP3— impedía la unión de los espermatozoides a los óvulos y la fecundación. En conjunto, estos resultados demostraron que los oligosacáridos O-ligados eran los elementos espermático-adhesivos de la molécula ZP3.

Sin embargo, no todos los oligosacáridos O-ligados manifestaban actividad espermático-receptora. Tanto en estudios en los que se separaban, con respecto a su tamaño, cadenas de azúcares, y se mezclaban con esperma, como en aquellos en los que se mezclaba el esperma con la dotación total de las cadenas de azúcares O-ligadas, obtenidas a partir de la ZP3, y en los que se suponía que estarían los oligosacáridos espermático-adherentes, se puso de manifiesto, para todos los casos, que no llegaban al 10 por ciento de los oligosacáridos O-ligados de la ZP3 los que podían trabarse con los espermatozoides. Los que lo hacían eran los de peso molecular de unos 3900 dalton.

El descubrimiento de que, en el reconocimiento del espermatozoide y el óvulo, están implicados azúcares O-ligados se suma a una masa creciente de datos que destacan la importancia de los azúcares para el reconocimiento entre gametos, así como en otros tipos de reacciones intercelulares, no sólo en los vertebrados sino también en los invertebrados y en los vegetales. En ese sentido, los azúcares son imprescindibles para la unión con especificidad-específica de espermatozoides y óvulos de invertebrados marinos, así como para la inducción de la reacción acrosómica. También hay pruebas de que los azúcares intervienen de manera decisiva en las interacciones gaméticas del invertebrado marino *Ciona intestinalis* (una ascidia) y el alga parda *Fucus serratus*.

Una vez sabido que la unión de la ZP3 a la cabeza del espermatozoide inducía la reacción acrosómica, pasamos a examinar el papel de la cadena polipeptídica de la ZP3 y sus oligosacáridos en ese proceso. Florman y yo comenzamos con la degradación enzimática de la ZP3 en sus glucopéptidos, entre los rangos de pesos moleculares de unos 1500 a 70.000 dalton, e, *in vitro*, añadimos al esperma glucopéptidos de varios tamaños.

Los glucopéptidos que eran mayores de unos 40.000 dalton inducían la reacción acrosómica; no así los menores (si bien en nuestros primeros experimentos los glucopéptidos pequeños lograron adherirse a espermatozoides de ratón). Además, los oligosacáridos O-ligados, obtenidos de una ZP3 ovular purificada, fracasaban también en la descarga de la reacción acrosómica.

Estas y otras observaciones permiten suponer que, si bien sólo se necesitan oligosacáridos O-ligados de la ZP3 para la unión óvulo-espermática, se requieren porciones relativamente largas de la molécula polipeptídica para inducir la reacción acrosómica. No ha sido aclarado, todavía, si es la cadena polipeptídica misma la que interactúa directamente con los espermatozoides adheridos; pudiera ser, por contra, que sirviera de mero soporte esquelético que permitiera, a un determinado número de oligosacáridos O-ligados, adecuadamente espaciados sobre la molécula ZP3, interactuar con el espermatozoide.

Tras haber averiguado algo sobre la unión de las moléculas de ZP3 a los espermatozoides y la producción de la reacción acrosómica por parte de aquéllas, volvimos a la cuestión de la pérdida, por la ZP3, de esas capacidades una vez fecundados los óvulos. ¿A qué obedecía? No se conoce la razón de los cambios que tienen lugar en la zona pelúcida después de la fecundación, pero sí se sabe que son una consecuencia de la llamada reacción cortical; ocurre ésta inmediatamente después de la fusión del óvulo con el espermatozoide y precede, también inmediatamente, a la reacción de zona. En la ratona, la reacción cortical comprende la fusión de la membrana plasmática del óvulo con la membrana que rodea a cada uno de los, aproximadamente, 4000 orgánulos ricos en enzimas, que se llaman gránulos corticales y se extienden bajo la membrana plasmática. La reacción provoca la expulsión de las enzimas granulares en el espacio perivitelino, desde el cual se filtran hacia la zona pelúcida.

¿Acaso dichas enzimas alteran las glucoproteínas componentes de la zona pelúcida? Ciertas pruebas, a partir de estudios con gametos del criceto o "hamster", permiten suponer que la molécula de mayor interés para nosotros, la ZP3, es alterada, sin duda, por las enzimas gránulo-corticales. Ryuzo Yanagimachi y sus colaboradores, de la Universidad de Hawai en Manoa, vieron que los espermatozoides de criceto no podían unirse a la zona pelúcida de óvulos expuestos a la acción de las enzimas gránulo-corticales. Es muy verosímil que lo mismo ocurra en el ratón: que la ZP3 quede inactivada como receptor espermático por una enzima gránulo-cortical. Visto el papel primario de los oligosacáridos O-ligados de la ZP3 en la adhesión con los espermatozoides, existe la posibilidad de que una enzima gránulo-cortical actúe, específicamente, sobre dichos oligosacáridos y los convierta en irreconocibles para los espermatozoides. En apoyo de esta idea, mis colegas y yo hemos encontrado que la eliminación o modificación de ciertos azúcares del extremo de los oligosacáridos O-ligados de 3900 dalton —algo que probablemente podrían hacer las enzimas gránulo-corticales— destruye su actividad receptora.

Aun cuando en estos últimos tiempos se hayan encontrado respuestas a muchas de las cuestiones relativas a las bases moleculares de la fecundación en los mamíferos, otras mantendrán ocupados a los biólogos en el futuro. Tendrán que ponerse a punto métodos con los que abordar las cuestiones pendientes de resolución. Así, el gen codificador de la ZP3 ha sido clonado el año pasado por Ross A. Kinloch, becario postdoctoral de mi laboratorio en Roche, y por Jurrien Dean y sus colaboradores, del Instituto Nacional de la Salud. La disponibilidad de tales clones incrementa la posibilidad de que las secuencias de ADN y los factores celulares que regulan la producción de los receptores espermáticos durante la ovogénesis puedan ser identificados prontamente. Se ha determinado ya la secuencia entera de aminoácidos de la cadena polipeptídica de la ZP3, en mi laboratorio y en el de Dean. Esta información podría facilitar la identificación de las regiones específicas de la ZP3 implicadas en la actividad espermático-receptora, en la inducción de la reacción acrosómica y en el ensamblaje de los filamentos de la zona pelúcida.

Con otros investigadores estamos intentando aislar las enzimas gránulo-corticales, que al parecer catalizan la reacción de zona; pretendemos hacer lo propio con la proteína óvulo-adherente del espermatozoide, que reconoce los oligosacáridos O-ligados de la ZP3, así como determinar la secuencia glucídica de los oligosacáridos O-ligados de 3900 dalton en la ZP3, que son reconocidos por el espermatozoide; esperamos, por último, ampliar nuestros estudios a la fecundación humana, para analizarla con mucho mayor detalle molecular, lo mismo que hemos analizado la fecundación del ratón. Los estudios moleculares de la fecundación humana podrían conducirnos a nuevos métodos de contracepción por interferencia de los receptores de unión espermáticos con las proteínas óvulo-adherentes. Esto podría, también, conducirnos a nuevos tratamientos de ciertas formas de esterilidad causadas por anomalías moleculares del espermatozoide o del óvulo.

Los estudios de la fecundación, en ratones y en otros animales, podrían llevarnos, incluso, a conocimientos más amplios. Las interacciones que tienen lugar entre óvulo y espermatozoide sólo representan una pequeña parte de las interacciones que se producen entre las células durante el desarrollo del animal, bien que sea parte esencial, dado que las interacciones óvulo-espermáticas inician ese desarrollo. Las actuales investigaciones sobre interacciones tan tempranas nos llevarán, indudablemente, a nuevos planteamientos de las interacciones celulares en general, que aportarán aplicaciones vitales para la medicina y otros campos del saber.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAMMALIAN SPERM-EGG INTERACTION: IDENTIFICATION OF A GLYCOPROTEIN IN MOUSE EGG ZONAE PELLUCIDAE POSSESSING RECEPTOR ACTIVITY FOR SPERM. Jeffrey D. Bleil y Paul M. Was en *Cell*, vol. 20, n.º 3, págs. 873-882; julio de 1980.

MECHANISMS AND CONTROL OF ANIMAL FERTILIZATION. Dirigido por John F. Hartmann. Academic Press, 1983.

O-LINKED OLIGOSACCHARIDES OF MOUSE EGG ZP3 ACCOUNT FOR ITS SPERM RECEPTOR ACTIVITY. Harvey M. Florman y Paul M. Wassarman en *Cell*, vol. 41, n.º 1, págs. 313-324; mayo de 1985.

EARLY EVENTS IN MAMMALIAN FERTILIZATION. Paul M. Wassarman en *Annual Review of Cell Biology*, vol. 3, págs. 109-142; 1987.

THE BIOLOGY AND CHEMISTRY OF FERTILIZATION. Paul M. Wassarman en *Science*, vol. 235, n.º 4788, págs. 553-560; 30 de enero de 1987.

Láseres de rayos X blandos

Un cuarto de siglo después de que apareciera el láser óptico, los láseres experimentales de rayos X han empezado a producir haces de fotones con longitudes de onda cien veces más cortas que las de la luz visible

Dennis L. Matthews y Mordecai D. Rosen

Transcurridos treinta años desde su invención, los láseres se han convertido en algo corriente en nuestra sociedad. Producen luz altamente concentrada, con una longitud de onda única; son los componentes fundamentales de aparatos muy dispares: sistemas de guía inercial de los aviones a reacción, bisturís de alta precisión utilizados en cirugía, lectoras de códigos de barras instaladas en los supermercados, equipos de reproducción de los discos compactos e impresoras láser.

El desarrollo del láser se ha caracterizado por una progresión continua hacia longitudes de onda cada vez más cortas. En un sentido estricto, los primeros láseres, construidos a finales de la década de 1950, eran máseres, dispositivos que no producían luz visible sino una radiación de longitud de onda mucho más larga: microondas. Un máser típico emitía un haz de microondas con una longitud de onda de cinco centímetros, algo menor, pues, que las señales de televisión de frecuencia ultraelevada. El láser propiamente dicho surgió hacia 1960. Corrientemente, un láser óptico emite un haz de luz visible con una longitud de onda de unos 500 nanómetros, lo que supone que su longitud de onda se ha reducido, respecto a la del máser, en un factor de 100.000. (Un nanómetro equivale a la mil millonésima parte del metro.)

DENNIS L. MATTHEWS y MORDECAI D. ROSEN contribuyeron al desarrollo inicial de los láseres de rayos X blandos. En 1974, Matthews recibió su título de doctor en física por la Universidad de Texas en Austin. Desde entonces, ha venido trabajando en el laboratorio nacional Lawrence Livermore (LL); dirige hoy el grupo de desarrollo y aplicación de los láseres de rayos X blandos. Rosen se doctoró en física del plasma en 1976, en la Universidad de Princeton. El Lawrence Livermore lo contrató para diseñar los blancos en el programa de confinamiento inercial (fusión por láser). Actualmente dirige la división de diseño de blancos de láser y es cotitular de la patente del láser de rayos X blandos. Al equipo de rayos X blandos del LL se le otorgó el premio del departamento de energía de los Estados Unidos para la investigación de calidad por su trabajo en el desarrollo del primer láser de rayos X blandos del mundo.

Uno de los sueños más huidizos de los físicos que han desarrollado el láser ha sido el de la producción de un láser de rayos X. Como sucede con las microondas, los rayos X difieren de la luz visible en su longitud de onda. Los rayos X ocupan la región del espectro de ondas electromagnéticas comprendida entre 10 y 0,01 nanómetros. Las longitudes de onda mayores suelen designarse con el calificativo de "blandas", debido a que los fotones de tales longitudes de onda son incapaces de atravesar el aire o los tejidos vivos. Las longitudes de onda más cortas, las de 0,03 nanómetros que utilizan los dentistas, por ejemplo, reciben el apelativo de "duras", para poner de manifiesto su poder penetrante.

Tras una espera de 25 años, el láser de rayos X ha entrado por fin en la escena científica, aunque los dispositivos actualmente existentes son todavía prototipos de laboratorio. Estos dispositivos producen rayos X blandos con longitudes de onda de cinco nanómetros, es decir, cifra 100 veces menor que las longitudes de onda de la luz visible. Los investigadores podrían producir rayos X cuyas longitudes de onda llegasen a alcanzar los dos nanómetros.

Hay múltiples aplicaciones potenciales para estos láseres de longitudes de onda cortas. La principal de ellas podría ser la creación de hologramas de estructuras biológicas, cuyo tamaño microscópico escaparía a la luz visible. Estos hologramas permitirían que los biólogos lograran representar la estructura tridimensional de las proteínas más importantes y la jerarquía de doblamientos que transforman el ADN desde su doble hélice fundamental hasta la estructura apretada de los cromosomas.

Los láseres de rayos X mantienen las características usuales de sus equivalentes ópticos: un haz muy compacto, coherencia espacial y temporal (lo que significa que los rayos X se mueven en fase unos respecto a otros) y un brillo o intensidad extraordinarios. Los láseres actuales multiplican, unos 100 millones de veces, el brillo de la fuente siguiente de rayos X más potente que existe en el mundo: el sincrotrón de electrones.

En principio, la única diferencia que existe entre un láser óptico y un láser de rayos X reside en que este último produce fotones con longitudes de onda mucho más cortas. Basta, sin embargo, tan sencilla discrepancia para obstaculizar duramente la construcción de uno de estos dispositivos. De hecho, el primer láser de rayos X no se construyó hasta el año 1984, en el laboratorio nacional estadounidense Lawrence Livermore (LL). Las dificultades son consecuencia directa de la mecánica cuántica, que establece que la longitud de onda de un fotón es inversamente proporcional a su energía: cuanto más corta es la longitud de onda de un fotón, tanto mayor es su energía. Las energías más altas provocan que el ingrediente fundamental de cualquier láser (la inversión de poblaciones en el material base) resulte mucho más difícil de conseguir.

Para entender el fenómeno de la inversión de poblaciones, nos centraremos en los láseres de neón y helio, que se utilizan en las lectoras de los códigos de barras de los supermercados. En estos láseres, una corriente eléctrica de alto voltaje excita, o bombea, un electrón atómico del gas de neón y helio desde su estado fundamental hasta un nivel de energía más elevado. Al cabo de cierto tiempo característico, el elec-

trón decae espontáneamente hasta una órbita inferior. En tal proceso se emite un fotón cuya energía corresponde a la diferencia de energías que existe entre las dos órbitas [*véase la figura 5*).

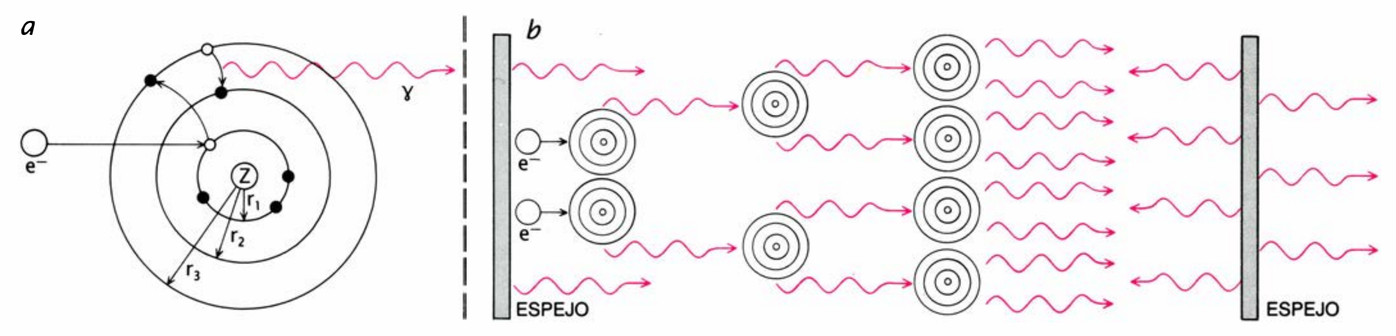
Algunos de los fotones emitidos a través de este proceso se encontrarán con otros átomos excitados y estimularán el retorno de sus electrones excitados hasta los niveles de energía más bajos. Durante esa desintegración estimulada, cada átomo emitirá un fotón; si suponemos que todas las transiciones tienen lugar entre los mismos dos niveles energéticos, todos los fotones poseerán la misma energía y, por tanto, la misma longitud de onda. La mecánica cuántica demuestra también que todos los fotones se emitirán en la misma dirección y en fase con los fotones incidentes. El proceso se repite una y otra vez, gracias a una sucesión de reflexiones entre dos espejos, hasta que termina creándose una avalancha de fotones, todos con la misma longitud de onda moviéndose en la misma dirección y en fase. Ahí reside el origen de la palabra "láser", formada por las iniciales de las palabras inglesas que significan "amplificación de luz por emisión estimulada de radiación".

Sin embargo, la producción de un haz de láser no puede tener lugar a no ser que la mayoría de los átomos posean más electrones en el estado excitado que en el estado fundamental; esta configuración se conoce como inversión de poblaciones. La inversión de poblaciones se hace difícil de conseguir, debido a que (de acuerdo con uno de los resultados básicos de la mecánica estadística) en un estado normal de equilibrio térmico existen más electrones en los niveles de energía baja que en los de energía más alta. Los electrones de los niveles de mayor energía tienden a decaer rápidamente para alcanzar este equilibrio. Si el número de átomos con electrones en el estado fundamental es mayor que el de átomos con electrones en estados excitados, se absorberán más fotones de los que se emiten y la emisión del láser no se producirá. En consecuencia, para conseguir una inversión importante es necesario bombear electrones hasta los estados excitados a un ritmo mucho mayor que el de desintegración.

La energía de cada fotón emitido es igual a la energía perdida por un electrón cuando decae, de un nivel de energía elevada, a otro nivel de energía



1. LASER NOVA del Lawrence Livermore. Se trata del láser óptico más potente del mundo y está capacitado para suministrar una energía de 100.000 joule en menos de una mil millonésima de segundo, lo que equivale a una potencia de 10^{14} watt. Dos de los 10 haces del Nova sirven de fuentes de energía de los láseres de rayos X, que requieren una energía de bombeo mil veces mayor que la de los láseres ópticos y que dicha energía se aporte en un tiempo 10.000 veces menor.



2. TODOS LOS LASERES operan por emisión estimulada, un proceso ilustrado en esta figura mediante el átomo de Bohr (*esquema de la izquierda*). La energía de bombeo (en este caso, electrones de alta energía) procedente de una fuente externa excita los electrones del átomo desde una órbita de baja energía (r_1) hasta una órbita de alta energía (r_3). El electrón decae espontáneamente hasta una órbita de energía intermedia (r_2) y emite un fotón (*líneas onduladas*) cuya energía es igual a la diferencia entre las energías de una y otra órbita. Este fotón colisiona con un átomo cuyos electrones se encuentran ya excitados y estimula a un electrón para que salte hasta un estado de energía más baja, emitiendo de ese modo un segundo fotón que se mueve en la dirección del primero y en fase con él. El proceso se repite hasta que la cascada resultante de fotones atraviesa el espejo convertida en un haz de láser coherente. (Hank Iken.)

inferior. Por tanto, si la energía de los fotones de rayos X blandos centuplica la de los fotones ópticos, para excitar a los electrones hasta los niveles deseados en un láser de rayos X es necesario bombear una cantidad de energía al menos 100 veces mayor que en los láseres ópticos. Las diferencias entre los niveles energéticos del neón-helio y otros materiales utilizados en los láseres ópticos son, en general, demasiado pequeñas para que se emitan fotones de alta energía en las transiciones electrónicas. En el laboratorio nacional Lawrence Livermore hemos tratado de resolver este problema recurriendo a elementos químicos de número atómico elevado, es decir, elementos que contienen un número muy alto de protones. En estos casos, la atracción electrostática debida al gran número de protones que existen en el núcleo enlaza muy fuertemente a los electrones más internos. Para excitar a estos electrones se necesita una cantidad de energía muy grande; recíprocamente, cuando los electrones en cuestión decaen, la energía de los fotones emitidos será también muy elevada.

No basta por sí solo el recurso a números atómicos elevados. Así, aunque el átomo de uranio tiene el número atómico más alto de todos los elementos naturales, no sería un material adecuado para los láseres de rayos X. Muchos de los 92 electrones del uranio no se hallan ligados fuertemente al núcleo, dado que la carga positiva de éste se encuentra eficazmente apantallada por la carga negativa de los electrones más internos. De hecho, la carga o número atómico efectivo del núcleo de uranio viene a ser casi nula. En consecuencia, lo primero que hay que hacer es ionizar la sustancia considerada, liberando sus electrones exteriores. Este proceso reduce el apantallamiento y aumenta la carga efectiva del núcleo (designada por Z) y permite, por tanto, que el resto de los electrones estén ligados más fuertemente.

Para conseguir que un átomo cuya carga efectiva se aproxima a cero se convierta en un ion "altamente cargado", con una carga efectiva Z, es necesario liberar un número de electrones externos igual a Z. Ahora bien, las energías de transición del modelo atómico más sencillo, así como la energía necesaria para liberar un electrón externo, son proporcionales a Z^2. En consecuencia, el requisito exigido de que la energía de los fotones emitidos centuplique la energía de los fotones ópticos hace necesaria, en el esquema del LL, la utilización de elementos cuyo valor de Z decuplique el de los elementos utilizados en los láseres ópticos. A su vez, este requisito supone que, para liberar los electrones externos, la energía que debe suministrarse a un láser de rayos X ha de ser unas 1000 veces mayor que la necesaria en un láser óptico: un factor 100 para la energía de cada electrón, multiplicado por un factor 10 para el número de electrones externos que han de liberarse.

Sucede, por otra parte, que la velocidad con que los electrones decaen espontáneamente hasta los niveles de energía más baja es proporcional a Z^4. Para alcanzar, pues, una inversión de poblaciones importante en los láseres de rayos X blandos no sólo se necesita una cantidad de energía 1000 veces mayor que en un láser óptico, sino que dicha energía debe suministrarse con una velocidad 10.000 veces mayor. Para conseguirlo, se utilizan láseres ópticos como dispositivos de bombeo. Las bombas utilizadas en el Lawrence Livermore son dos haces procedentes de un dispositivo conocido como Nova de 10 haces, el láser más potente del mundo [véase "Avances en la fusión por láser", por R. Stephen Craxton, Robert L. McCrory y John M. Soures; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1986], capaz de suministrar hasta 10^{14} watt en forma de un pulso de duración inferior a un nanosegundo.

Se crearon esos láseres para el programa de fusión que se lleva a cabo actualmente en el LL, cuyo objetivo último consiste en proporcionar una fuente de energía casi inagotable a través del proceso de fusión nuclear. Aunque el Lawrence Livermore es un laboratorio mundialmente conocido por sus trabajos sobre los láseres de rayos X duros, en los que la energía de bombeo se suministra a través de explosiones nucleares, y que pueden aplicarse en la Iniciativa de Defensa Estratégica (conocida vulgarmente como "Guerra de las Galaxias"), los láseres de rayos X blandos no tienen una aplicación militar directa. Estos láseres, y las herramientas científicas que resulten de su desarrollo podrían algún día ocupar un lugar en el diseño y estudio de los láseres de fusión y de los láseres de rayos X duros. El trabajo que vamos a exponer no viola, empero, ningún secreto de estado.

En los láseres de rayos X que están operando actualmente en el LL, un haz procedente del Nova bombardea una lámina delgada de selenio, itrio o molibdeno. Aunque estos elementos (cuya utilización fue sugerida por Peter L. Hagelstein, hoy en el Instituto de Tecnología de Massachusetts) son normalmente sólidos, sus átomos se pueden ionizar por el método antes descrito. En realidad, cuando el haz del Nova bombardea las láminas, las vaporiza totalmente y origina un plasma en el que los átomos de selenio (con 34 electrones) han perdido los 24 electrones externos. Los electrones liberados por el intenso haz del Nova poseen una energía elevada, del orden de 1000 electronvolt (1 keV), o, lo que es lo mismo, una temperatura de 10 millones de grados Kelvin. Estos electrones se mueven

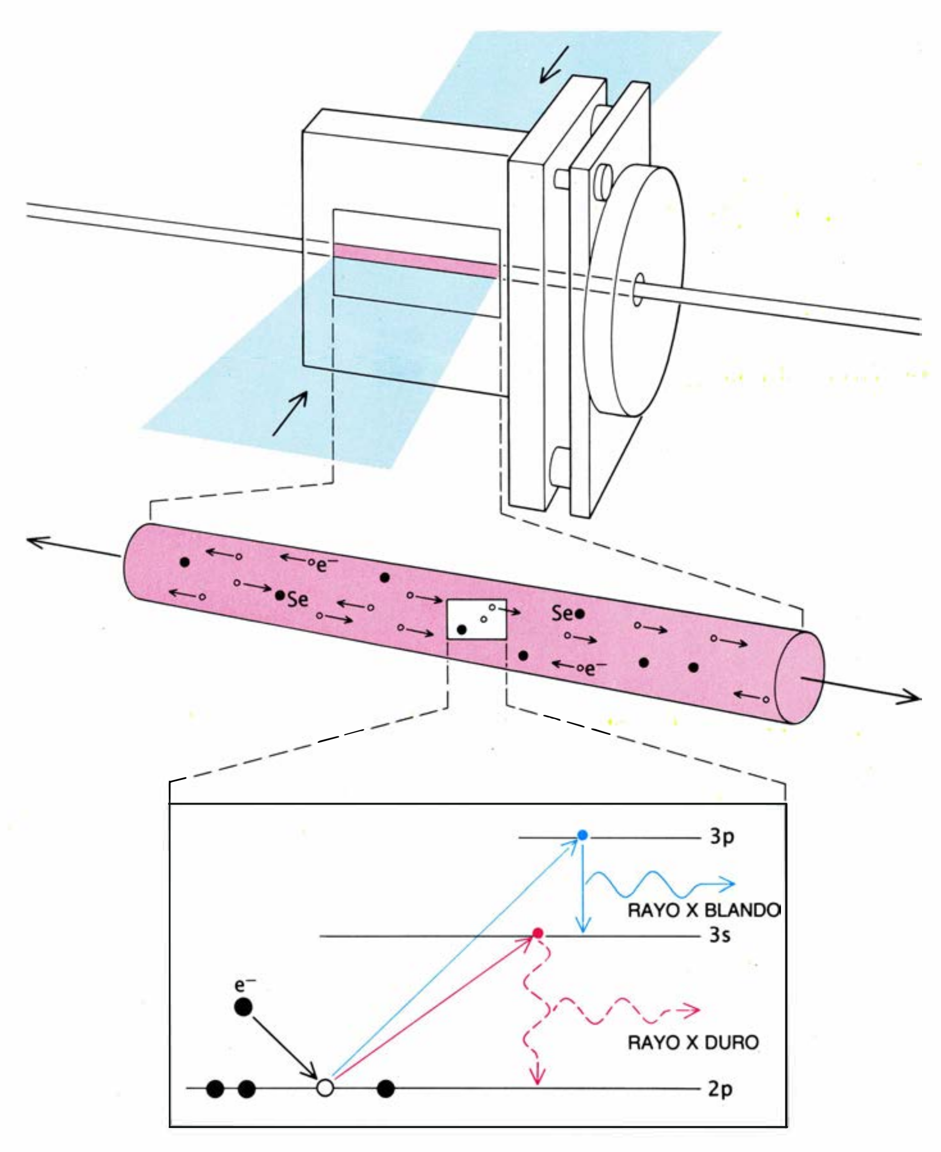
a través del plasma y, al colisionar con los iones de selenio del mismo, excitan a alguno de los 10 electrones restantes (los internos) hasta los niveles de energía deseados. Este mecanismo de excitación por colisión fue propuesto, hace más de veinte años, por Raymond C. Elton, del laboratorio de Investigación Naval, y Michel A. Duguay, de los laboratorios ATT Bell.

Visto con mayor detalle, los electrones internos de los iones de selenio se encuentran en su estado fundamental, denominado normalmente como estado $1s^2\ 2s^2\ 2p^5$, o, más brevemente, estado $2p$ [*véase la figura 3*]. (Las letras *s* y *p* se refieren a los orbitales atómicos cuyos números cuánticos del momento angular orbital son 0 y 1, respectivamente. Los números que preceden a estas letras indican los niveles energéticos que corresponden al número cuántico principal *n*; los superíndices se refieren al número de electrones existentes en cada nivel.) Las colisiones con los electrones libres de alta energía excitan a los electrones $2p$ de algunos de los iones presentes hasta un nivel energético situado 1,5 keV por encima de dicho estado, concretamente el $1s^2\ 2s^2\ 2p^5\ 3p$ ($3p$). (En un plasma cuya energía media es 1 keV existen muchos electrones cuya energía es mayor que 1,5 keV y que, por tanto, son capaces de producir dicha excitación.)

Cabría esperar normalmente que el nivel $3s$ se llenara con electrones antes que el nivel $3p$, dado que su energía es menor. Sin embargo, los electrones del estado $3s$ decaen muy rápidamente hasta el estado fundamental $2p$. Este proceso de desintegración está prohibido, en mecánica cuántica, para los electrones del estado $3p$; por consiguiente, los electrones permanecen en dicho estado durante largo tiempo. Habitualmente, el 96 por ciento de los iones tendrán electrones en el estado $2p$, el 3 por ciento electrones en el estado $3p$ y el 1 por ciento restante tendrá electrones en el estado $3s$. Se produce, pues, una inversión de poblaciones entre los estados $3p$ y $3s$. Las transiciones entre estos dos estados están permitidas; cuando los electrones en el nivel $3p$ decaen de forma espontánea hasta el nivel $3s$, se emite un fotón de rayos X blandos con una longitud de onda de 20 nanómetros. Estos fotones inician la acción del láser, estimulando a otros iones excitados similares para que emitan fotones de esa misma longitud de onda.

Una vez se han producido los fotones de la longitud de onda requerida, se procede a su amplificación. En los láseres ópticos, la amplificación del haz se consigue por reflexiones sucesivas de los fotones en dos espejos enfrentados. Sólo los fotones que se mueven a lo largo del eje del láser se reflejan e intervienen en el proceso de amplificación; los fotones que no se reflejan, se separan del haz rápidamente (hecho que explica también por qué un haz de láser está tan colimado). Sin embargo, en el caso de los rayos X, no existen espejos que sean reflectores al ciento por ciento. En consecuencia, los investigadores se han visto forzados a desarrollar otras técnicas capaces de producir la amplificación de los rayos X.

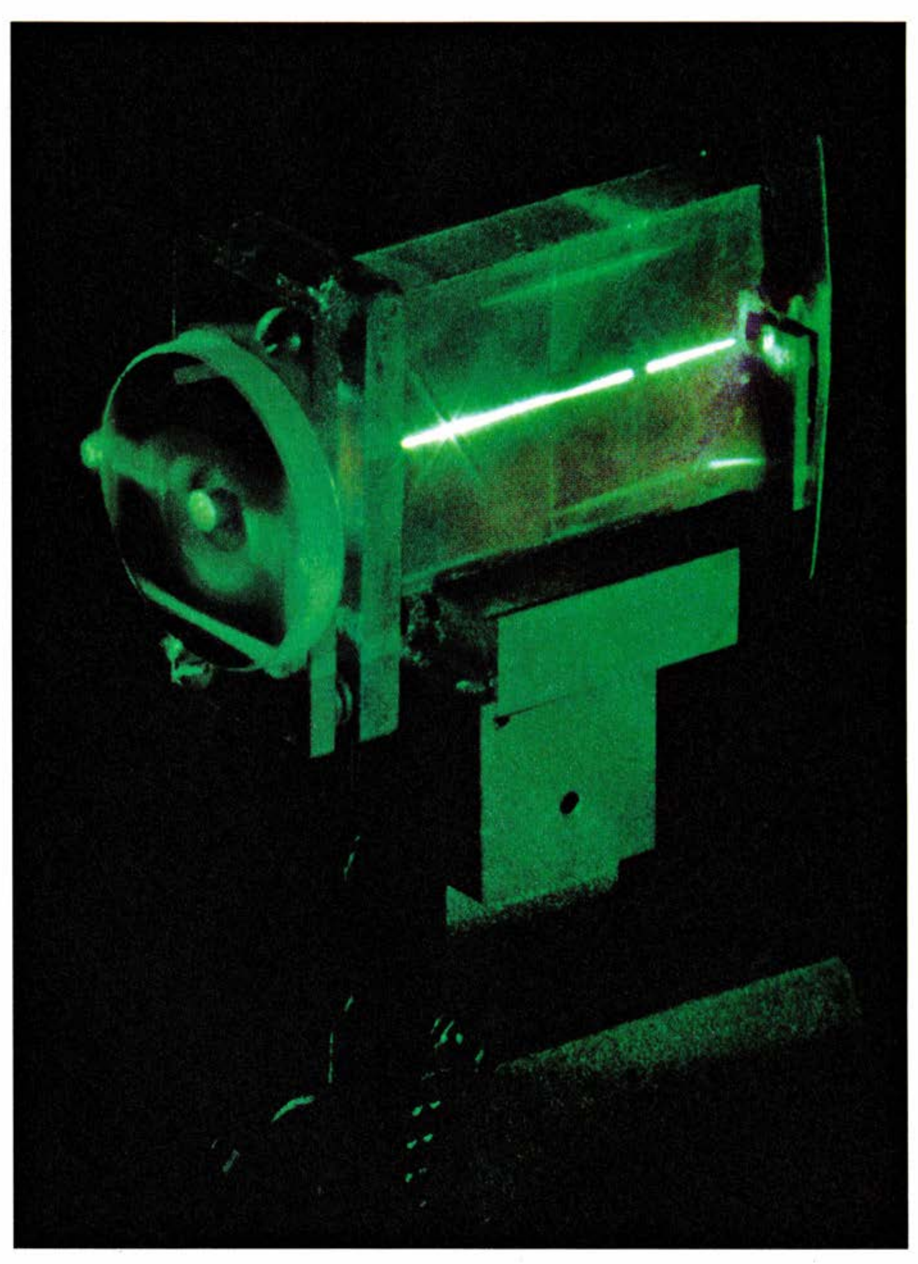
Las láminas de selenio utilizadas en el Lawrence Livermore presentan unos 75 nanómetros de espesor, varios milímetros de anchura y una longitud de algunos centímetros. Estas láminas se han depositado sobre un sustrato de vinilo que les confiere rigidez. Mediante un juego de lentes especiales, el haz del Nova se focaliza sobre una línea de la misma longitud que la lámina, si bien su anchura es tan sólo de 0,1 milímetros. Cuando un impulso de estas dimensiones procedente del Nova incide sobre el blanco de selenio, la delgada lámina de este material se calienta en toda su extensión, explotando y dando lugar a un plasma de forma cilíndrica con un diámetro de 0,1 milímetros y una longitud cientos de veces mayor. Esta forma cilíndrica proporciona un eje preferente para la amplificación de los rayos X: los fotones que se mueven en una dirección radial abandonan el



3. EL PULSO OPTICO del Nova inicia el proceso de emisión de un láser de rayos X. El haz procedente del Nova incide sobre un blanco rectangular de selenio. Este se vaporiza, creando un plasma cilíndrico consistente en electrones libres e iones de selenio. En un proceso de excitación por colisión, un electrón libre colisiona con un ion de selenio y excita a uno de los electrones aún ligados que está en el estado fundamental *2p* o en alguno de los estados de energía más alta *3s* y *3p*. Los electrones del estado *3s* decaen muy rápidamente al estado fundamental; las transiciones desde el estado *3p* al estado fundamental están prohibidas. El resultado es que los iones con un electrón en el estado *3p* superan en número a los que poseen un electrón en el estado *3s*, una situación conocida como inversión de poblaciones. Los electrones que decaen desde el estado *3p* al estado *3s* emiten fotones de rayos X; estos fotones estimulan, a su vez, los iones en el estado *3p* y los inducen a emitir otros fotones con la misma fase. El haz de láser que resulta se encuentra formado por estos fotones.

plasma, en tanto que los que se mueven a lo largo de dicho eje estimulan la emisión de otros rayos X. Puesto que no existen espejos, el proceso de amplificación acontece en una sola pasada.

Demostrar que el efecto láser se produce en uno de estos dispositivos no es tarea fácil; según se recordó más arriba, los primeros experimentos que se vieron coronados por el éxito se llevaron a cabo en el Lawrence Livermore hace cuatro años escasos. Tres observaciones importantes demostraron que se había producido el efecto láser. En primer lugar, encontramos que en el haz de rayos X emitidos existían ciertas líneas espectrales que brillaban más que las restantes; ello ponía de manifiesto que se estaban produciendo las oportunas transiciones atómicas. Descubrimos, en segundo lugar, ciertas líneas cuya emisión era mucho más intensa a lo largo del eje del haz que en otras direcciones. En tercer lugar, y lo que era más importante, procedimos a medir la variación de la intensidad de los rayos X con la longitud del blanco. Si el efecto láser se había producido, el número de fotones que entraban en la avalancha debería aumentar exponencialmente con la longitud del blanco y, por tanto, la intensidad del haz debería crecer también de ese modo. Este comportamiento se confirmó en nuestras observaciones [*véase la figura 5*].



4. NO SE USAN ESPEJOS en la mayoría de prototipos de láser de rayos X, porque, hasta fecha reciente, no se disponía de espejos capaces de reflejar los rayos X. (El espejo redondo de un extremo de este dispositivo sólo se utiliza a efectos de alineamiento.) La longitud del plasma cilíndrico (*línea brillante*) que se origina cuando el blanco de selenio explota bajo el impacto del pulso del Nova supera centenares de veces su anchura. Tan sólo los fotones que se mueven a lo largo del eje longitudinal de dicho cilindro formarán parte del haz de láser. Los rayos X que emite el selenio tienen una longitud de onda del orden de 20 nanómetros.

Desde que se acometieron estos ensayos iniciales, se han descubierto otros muchos iones capaces de producir láseres de rayos X con longitudes de onda comprendidas entre los 30 y los 10 nanómetros. La intensidad del láser de selenio, que emite rayos X de 20 nanómetros, aumenta en un factor de 100.000 cuando su longitud pasa de uno a cuatro centímetros; la potencia de salida de este láser varía entre 5 y 10 megawatt en un pulso que dura 0,1 nanosegundos.

Aunque esta potencia de salida resulta impresionante, la eficiencia del mecanismo de excitación por colisión que se utiliza en los láseres de selenio es insuficiente para generar longitudes de onda mucho más cortas que las citadas. Por ejemplo, en un blanco de plata, cuyo número atómico es 47 (recuérdese que el del selenio es 34), se produce un haz de rayos X de unos 10 nanómetros. Para producir un haz de cuatro nanómetros sería necesario recurrir a elementos con valores de Z todavía mayores, pero, con los actuales mecanismos de excitación, se necesitaría un bombeo óptico cuya potencia decuplicara la del Nova, que, como hemos dicho, es el láser más potente que existe actualmente en el mundo.

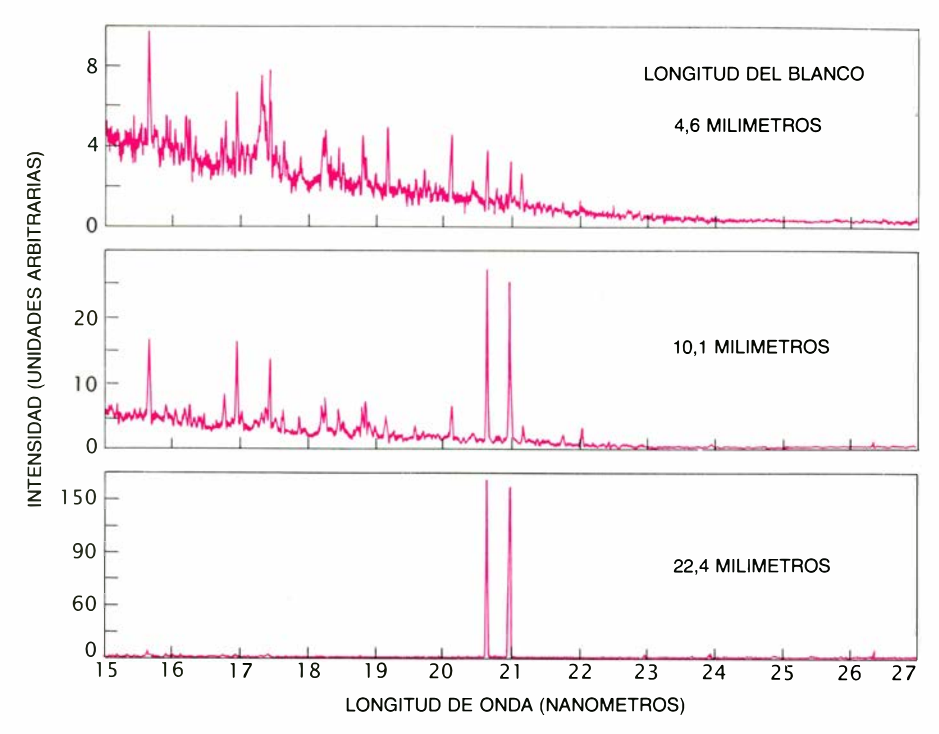
El diseño de los láseres descritos anteriormente no hubiera sido posible sin la ayuda de dos programas de simulación por ordenador muy avanzados: el LASNEX, desarrollado en las dos últimas décadas por George B. Zimmerman y sus colaboradores en el Lawrence Livermore y destinado al programa de fusión con láser, y el XRASER, desarrollado por Hagelstein en la misma época. El programa LASNEX modela la física fundamental del bombeo del láser y su interacción con la lámina del blanco. El diseñador proporciona como datos de entrada la forma, el tamaño y la composición del blanco propuesto, así como las especificaciones del haz del Nova. El LASNEX calcula entonces cómo explotará el blanco y cómo variarán con el tiempo la densidad, temperatura y presión del plasma resultante.

El programa XRASER toma estas cantidades como parámetros de entrada, junto con toda una serie de datos relacionados con la física atómica; calcula entonces las poblaciones de electrones de los diferentes niveles energéticos del plasma de selenio, el ritmo de las respectivas transiciones y, finalmente, la ganancia o amplificación del láser de

rayos X. Si las especificaciones del haz y del blanco se han escogido correctamente, XRASER predecirá una ganancia que aumentará exponencialmente con la longitud del blanco, indicando que la emisión estimulada de fotones está produciéndose. Si las especificaciones elegidas no son las adecuadas, los resultados del XRASER lo pondrán de manifiesto. Estos programas se han mejorado y ampliado considerablemente a lo largo de estos 10 últimos años, contrastando sus predicciones con los resultados experimentales e incorporando todo lo que se ha ido aprendiendo con ello. Las versiones actuales de los programas XRASER y LASNEX sirven, cada vez con mayor fiabilidad, como instrumentos de diseño y diagnóstico cuyas predicciones concuerdan, en sus pormenores, con muchas características de los láseres de selenio (aunque no con todas).

M. Stephen Maxon, Richard London y sus colaboradores en el Lawrence Livermore han aplicado recientemente los programas LASNEX y XRASER al diseño de láseres con ganancias para longitudes de onda de hasta cinco nanómetros. Posteriormente, Brian MacGowan y sus colaboradores han demostrado la viabilidad del diseño. Los blancos eran láminas de iterbio con 42 electrones liberados y con uno de los 28 electrones más internos excitados desde el estado 3*d* al 4*d*; el mecanismo es análogo al utilizado en el láser de selenio, excepto en que la inversión de poblaciones se produce entre los estados 4*d* y 4*p*. (La letra *d* se refiere a un estado cuyo número cuántico del momento angular es igual a 2). Los programas predicen también una buena ganancia para las longitudes de onda comprendidas entre 4,48 y 4,16 nanómetros en los blancos de tántalo, tungsteno y renio; estas predicciones se comprobarán en fecha próxima.

Tal como hemos señalado, todos los láseres de rayos X que hemos descrito anteriormente son dispositivos de paso único. Si existieran espejos capaces de reflejar rayos X, podría producirse una amplificación de paso múltiple y, por tanto, podría amplificarse significativamente la salida del láser. Eberhard A. Spiller, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM, inventó los primeros espejos de rayos X en los años setenta. Desde entonces, esta técnica ha avanzado bastante, hasta el punto de que dichos espejos se han utilizado con éxito en distintos ensayos realizados en el Lawrence Livermore, en la Universidad de Princeton y en la Universidad de París.



5. LA LONGITUD DEL BLANCO determina la amplificación del láser. El número de fotones que participan en la acción láser aumenta exponencialmente con la longitud del blanco; en consecuencia, la intensidad del haz crece también exponencialmente. Este comportamiento se observa en las líneas espectrales de un blanco de selenio. En la gráfica superior, la línea de emisión de 21 nanómetros tiene una intensidad relativa próxima a tres para una longitud del blanco de 4,6 milímetros. En la gráfica del centro, donde la longitud del blanco ha aumentado en un factor de 2,2, la intensidad de la línea ha crecido en un factor de casi nueve. Cuando la longitud del blanco alcanza un valor de 22,4 milímetros, las líneas de emisión dominan el espectro.

Los espejos de rayos X que Natale M. Ceglio, Troy W. Barbee, Jr., y sus colaboradores actualmente están construyendo en el Lawrence Livermore constan de una serie de capas de un material transparente a los rayos X situadas entre otras capas de un material que refleja los rayos X con la máxima eficiencia posible. Rendimiento que asciende sólo a un 1,3 por ciento del campo eléctrico del haz de láser incidente. Si la distancia que separa dos capas reflectantes sucesivas equivale a media longitud de onda, los rayos X reflejados en estas dos capas interferirán constructivamente, aumentando el poder reflector eficaz. Este proceso de reflexión recibe la denominación técnica de difusión de Bragg. Los espejos de rayos X desarrollados hasta la fecha pueden tener hasta varios centenares de capas, cada una de las cuales posee un espesor de unos 100 átomos; la mejor reflectividad obtenida hasta la fecha corresponde a una intensidad del 60 por ciento para una longitud de onda de 120 nanómetros, y se ha obtenido con un espejo de 30 capas.

Incluso contando con la ayuda de estos espejos, la obtención de una amplificación de paso múltiple es una tarea difícil. Si la distancia entre los espejos y el blanco no llega al centímetro, la radiación procedente de la vaporización del selenio los perjudica o los destruye. Por otra parte, el plasma se está expandiendo y diluyendo en una escala temporal que es tan sólo un poco mayor que el tiempo necesario para que los rayos X atraviesen dicho plasma. En consecuencia, al cabo de pocos recorridos, el plasma se habrá disipado y el láser será ya incapaz de seguir amplificándose. En los experimentos llevados a cabo en el Lawrence Livermore, hemos demostrado que, en dos de estos recorridos a través del plasma, la potencia generada es 30 veces mayor que la obtenida en un solo recorrido; pone ello de manifiesto que el espejo ha sobrevivido durante este tiempo y que está teniendo lugar una amplificación de paso doble.

En un ensayo todavía más audaz, intentamos conseguir una amplificación de paso triple, utilizando, amén de un espejo de rayos X, un dispositivo capaz de desdoblar un haz de rayos X (un espejo parcialmente transmisor). Aunque el experimento tuvo éxito, se pudo observar que en el tercer paso el plasma se había diluido hasta tal punto que la amplificación era virtualmente nula.

Una posible solución al problema de la disipación consiste en utilizar blancos sólidos que no se vaporicen por completo cuando se someten a un bom-

beo óptico. Cabría una opción alternativa mejor: emplear un láser de bombeo óptico con una duración del pulso grande, con lo cual se conseguiría que la vaporización del blanco tuviera lugar de forma gradual y el plasma se alimentara de forma continua; este mecanismo resolvería el problema de la dilución. Estamos investigando en la actualidad esta posibilidad.

Aunque los láseres de rayos X blandos que operan en el Lawrence Livermore resultan muy prometedores, se encuentran todavía en una fase preliminar. Cuando estos láseres de rayos X adquieran mayor seguridad y eficacia y sean menos caros, tendrán muchas aplicaciones importantes. Primera y principal, sus longitudes de onda cortas, y su coherencia y brillo muy elevados, posibilitarán la exploración de estructuras vivas de tamaño mucho menor que lo que se puede ver actualmente mediante métodos ópticos.

No existen todavía las herramientas de diagnóstico capaces de obtener imágenes de alta resolución de especímenes vivos subcromosómicos. Por ejemplo, la microscopía electrónica necesita trabajar con láminas de muestras deshidratadas y tratadas con un fijador metálico, lo que provoca la muerte de las muestras. Los microscopios de observación por efecto túnel y los microscopios de observación de rayos X exigen tiempos de observación elevados, durante los cuales el movimiento de los objetos da lugar a que sus imágenes sean borrosas.

Los láseres de rayos X blandos proporcionarán una solución a este problema. Las longitudes de onda cortas de los rayos X —para una longitud de onda de 4,4 nanómetros, el contraste entre el agua y la estructura biológica es máximo— permitirá obtener imágenes de alta resolución; su elevado brillo y coherencia posibilitarán el empleo de tiempos de exposición muy cortos, lo que permitirá "congelar" los objetos en movimiento. Como es natural, la muestra resultará destruida por el haz de rayos X; ahora bien, cuando eso suceda la exposición se habrá ya realizado. Utilizando estas técnicas, los científicos podrán obtener hologramas *in vitro* de alta resolución para estructuras vivas.

Recientemente, un grupo de investigación del Lawrence Livermore, dirigido por James E. Trebes, ha utilizado nuestro láser de selenio de 20 nanómetros para crear los primeros hologramas de rayos X de objetos inanimados: una fibra de carbono de 8000 nanómetros de diámetro y una fibra de oro de 10.000 nanómetros de diámetro. El éxito de estos experimentos constituye un primer paso importante hacia la utilización de rayos X blandos en la investigación de estructuras vivas. Sin embargo, será necesario todavía realizar mucho trabajo de diseño hasta conseguir plena potencia coherente en una longitud de onda de cuatro nanómetros.

Las longitudes de onda cortas y las intensidades elevadas de los láseres de rayos X harán posible también la utilización de estos dispositivos en la investigación de los plasmas, tales como los que se producen cuando el láser Nova vaporiza un blanco de selenio; contribuirán con ello al desarrollo posterior de los propios láseres de rayos X. Hasta ahora, se han venido empleando láseres ópticos en el control de los plasmas, pero estos dispositivos sólo son capaces de proporcionar información sobre dichos plasmas cuando su densidad es menor que 0,001 gramos por centímetro cúbico, dado que los haces ópticos se refractan íntegramente si la densidad supera dicho valor. La utilización de rayos X blandos permitirá que los investigadores controlen plasmas cuyas densidades sean cuatro órdenes de magnitud más elevadas que las que son accesibles en la actualidad.

Los láseres de rayos X pueden ser capaces no sólo de controlar a los plasmas, sino también de producirlos. Hemos calculado que, cuando el haz de un láser de rayos X bombardee un blanco sólido, se crearán plasmas cuya densidad y temperatura serán mucho mayores que las de los plasmas producidos actualmente, incluso cuando el haz del láser Nova bombardea un blanco de selenio. Avance que posibilitaría estudiar mucho mejor el comportamiento de un plasma a temperaturas y densidades parecidas a las que reinan en el interior solar.

Aunque estas aplicaciones sólo serán posibles en el futuro, los progresos en el campo de los láseres de rayos X han sido enormes. Hace tan sólo 10 años, la construcción de estos dispositivos se habría considerado imposible. La investigación actual ha llegado a un punto en el que los láseres de rayos X pulsantes funcionan ya con normalidad, se han fabricado espejos de rayos X de alto poder reflector y se han producido los primeros hologramas de rayos X.

A lo largo de esta última década, el avance en longitudes de onda cada vez más cortas ha sido también muy importante, y no parece que exista un límite en este sentido. De hecho, se están desarrollando ya nuevos procedimientos para alcanzar longitudes de onda de 2,8 nanómetros o, incluso, menores.

Podría parecer que este tipo de progresos quedará confinado para siempre en los laboratorios y que los dispositivos que para funcionar necesitan recurrir al millón de gigawatt del Nova como sistema de bombeo nunca podrán ser algo práctico y de pequeño tamaño. Aunque es cierto que el mecanismo utilizado en el Lawrence Livermore, basado en números atómicos Z grandes, requiere una potencia de bombeo muy grande, se está trabajando también en otros sistemas de láseres de longitudes de onda cortas en el propio LL (donde esta investigación se lleva a cabo bajo la dirección de David Eder y Christopher J. Keane), en Princeton (Szymon Suckewer y Charles Skinner), en el laboratorio inglés Rutherford Appleton (Michael Key y Geoff Pert), en la Universidad de París (Pierre Jaeglé) y en otros muchos laboratorios, universidades e industrias de todo el mundo.

En contraste con el sistema descrito en el presente artículo, algunos de los nuevos procedimientos no requieren átomos con un valor de Z elevado y dispositivos de bombeo de alta potencia como el Nova. Estos procedimientos se basan en mecanismos de excitación más eficientes, cuyas exigencias de energía son mucho menores. Los nuevos métodos pueden acabar alcanzando el éxito de conseguir una reducción sustancial en las exigencias de energía, hasta el punto de permitir que los láseres de rayos X de sobremesa puedan convertirse en realidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DEMOSTRATION OF A SOFT X-RAY AMPLIFIER. D. L. Matthews et al. en *Physical Review Letters*, vol. 54, n.° 2, págs. 110-114; 14 de enero de 1985.

EXPLODING-FOIL TECHNIQUE FOR ACHIEVING A SOFT X-RAY LASER. M. D. Rosen et al. en *Physical Review Letters*, vol. 54, n.° 2, págs. 106-109; 4 de enero de 1985.

LABORATORY PRODUCTION OF X-RAY LASERS. M. H. Key en *Nature*, vol. 316, n.° 6026, págs. 3 25 de julio de 1985.

INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON X-RAY LASERS. Dirigido por P. Jaeglé y A. Sureau en *Journal de Physique*, vol. 47, fasc. 10, Colloque C6; octubre de 1986.

THE GENERATION OF COHERENT XUV AND SOFT-X-RAY RADIATION. Dirigido por Dennis L Matthews y Richard R. Freeman en *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 4, n.° 4, págs. 530-618; abril de 1987.

Serpientes, circulación de la sangre y gravedad

Cuando una serpiente trepa o se yergue, su sistema cardiovascular debe resistir fuertes gradientes de presión. La gravedad explica por qué el sistema circulatorio de las especies arbóreas difiere del característico de las marinas

Harvey B. Lillywhite

La gravedad es una fuerza omnipresente en nuestro mundo y tanto los animales como las plantas se han adaptado a ella de múltiples formas. Los árboles, por ejemplo, alcanzan alturas extraordinarias (de hasta 110 metros) y los fluidos vitales continúan circulando hasta sus ramas superiores. En el extremo contrario, tenemos a los animales que viven en el fondo del mar. ¿Cómo se desenvuelven a profundidades superiores a los 5700 metros, donde el peso de la columna de agua sobrepasa los 610 kilogramos por centímetro cuadrado? No resulta sorprendente que estas y otras adaptaciones a la gravedad hayan atraído la curiosidad de los científicos durante siglos.

En ambientes terrestres, la gravedad requiere especiales demandas del sistema cardiovascular de los animales y sus efectos pueden dejarse sentir de modo particular en las especies mayores que adoptan posiciones verticales. Debido a que el diseño del sistema cardiovascular de un animal refleja su forma de vida y el grado en que es afectado por la gravedad, algunos animales han evidenciado ser modelos valiosos para los estudios sobre regulación circulatoria. La jirafa es uno de estos animales. Dado que su cabeza ocupa una posición muy elevada con respecto al corazón, son necesarias presiones fuera de lo común para impulsar la sangre hasta el cerebro. Sin embargo, de entre todos los vertebrados, quizá las serpientes destacan por el grado de difusión y variabilidad de las adaptaciones en las que están involucrados la gravedad y el sistema cardiovascular.

HARVEY B. LILLYWHITE es profesor de zoología en la Universidad de Florida en Gainesville. Licenciado por la Universidad de California en Riverside, se doctoró en ecología fisiológica por la Universidad de California en los Angeles. Es miembro del comité ejecutivo de la División de Fisiología y Bioquímica Comparadas de la Sociedad Americana de Zoólogos y ha mostrado desde hace mucho tiempo su interés sobre aspectos de conservación de la naturaleza.

Las serpientes son animales considerablemente bien adaptados. En el transcurso de su historia evolutiva, que sobrepasa los 100 millones de años, se han diversificado con éxito ocupando nichos ecológicos muy dispares. En la actualidad existen unas 16 familias y 2700 especies de serpientes en el mundo. Exhiben un extenso rango de tallas corporales, ocupan muchos hábitats distintos y presentan amplias variaciones comportamentales. Algunas serpientes son enteramente acuáticas, otras son terrestres y gran número viven en los árboles.

Esta diversidad resulta en parte posible debido a que las serpientes poseen sistemas cardiovasculares de admirable eficacia que les permite la circulación de la sangre contra la fuerza de la gravedad. Una serpiente del maizal (*Elaphe guttata*), por ejemplo, puede subir verticalmente por el tronco de un árbol en busca de huevos de un nido desprotegido; una boa arbórea puede colgar de un árbol cabeza abajo mientras persigue a una presa. Ambos animales se desenvuelven de un modo impensable sin un sistema cardiovascular adaptado para mantener la circulación adecuada de la sangre cuando el cuerpo se separa de la posición horizontal.

Para entender por qué la gravedad requiere estas demandas de los sistemas circulatorios de los animales, es útil considerar los vasos sanguíneos como tubos cilíndricos. Si un cilindro lleno de agua y cerrado herméticamente se gira colocándolo sobre uno de sus extremos, el peso del agua que contiene crea un gradiente vertical de presión, el valor más bajo en la parte superior del tubo y el más alto en el fondo, no variando substancialmente el del centro de la columna. Si, en vez de un cilindro rígido, se llena de agua y se sostiene verticalmente un globo alargado y estrecho, éste se combará por el fondo y quizá se romperá por la presión del agua que contiene. La presión así creada se denomina presión gravitatoria. Aumenta con la profundidad y se halla en cualquier columna fluida continua, independientemente de que el fluido esté o no en movimiento. Si el fluido se mantiene en movimiento mediante una bomba, como ocurre en el sistema circulatorio, la presión total aumenta: la presión creada por la bomba, o el corazón, se suma a la impuesta por la gravedad.

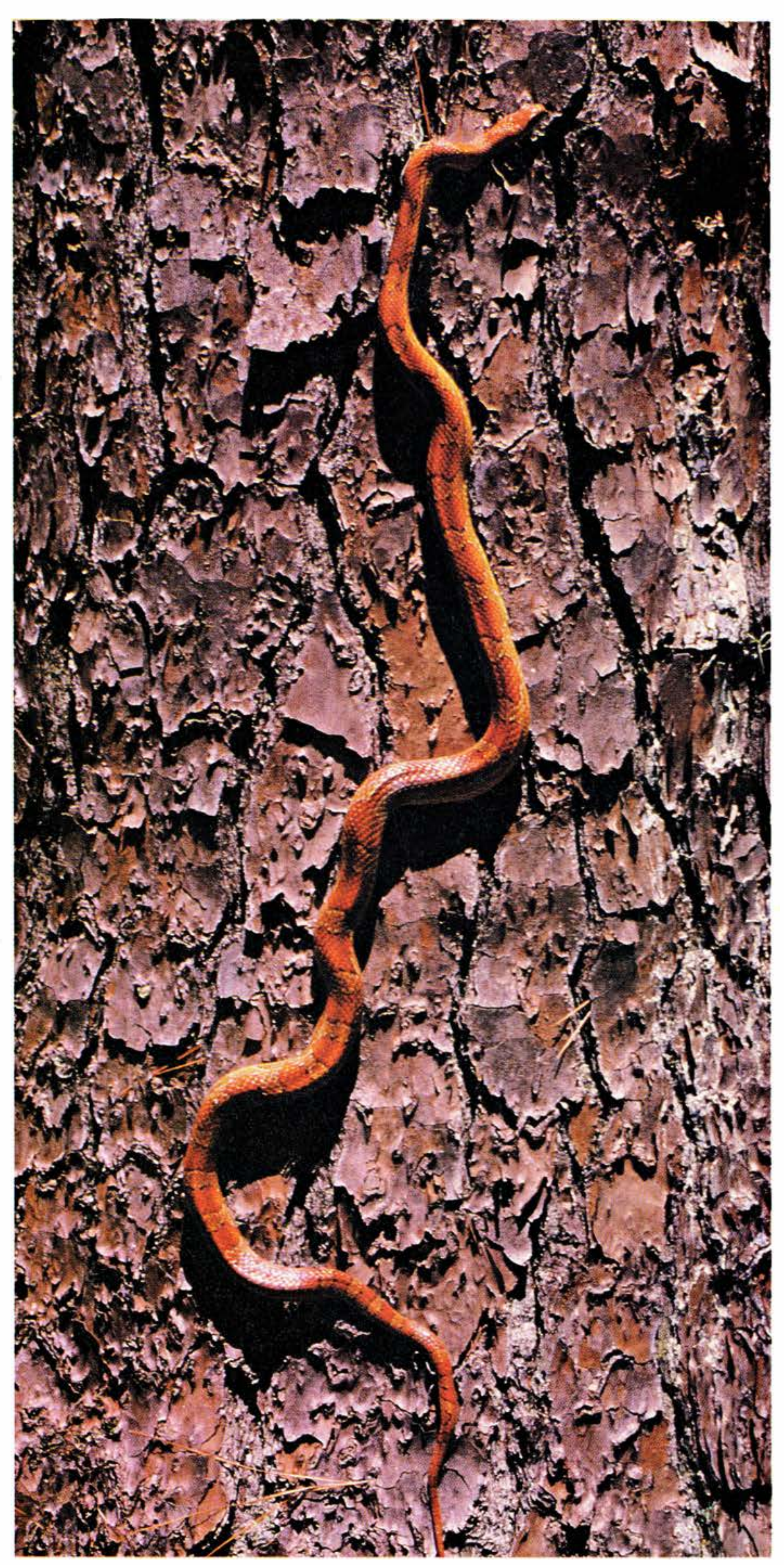
La presión gravitatoria puede afectar seriamente a los animales mayores que no estén adaptados fisiológicamente para soportar su fuerza. El incremento de presión en los vasos situados en parte más baja del sistema circulatorio de un animal tiende a causar la acumulación de la sangre: distiende las paredes de los vasos y puede originar la pérdida de plasma en los capilares. A medida que la sangre se acumula en la parte inferior del cuerpo, la presión sanguínea central disminuye y falla finalmente la circulación en órganos críticos como el cerebro. Si todas las serpientes, excepto las más pequeñas, fueran muy propensas a la acumulación de la sangre, quedarían confinadas a la vida acuática o a la posición horizontal. Pero éste no es evidentemente el caso.

Hace algo más de 10 años me interesé por la capacidad de las serpientes para mantener adecuadamente la circulación de la sangre mientras están en

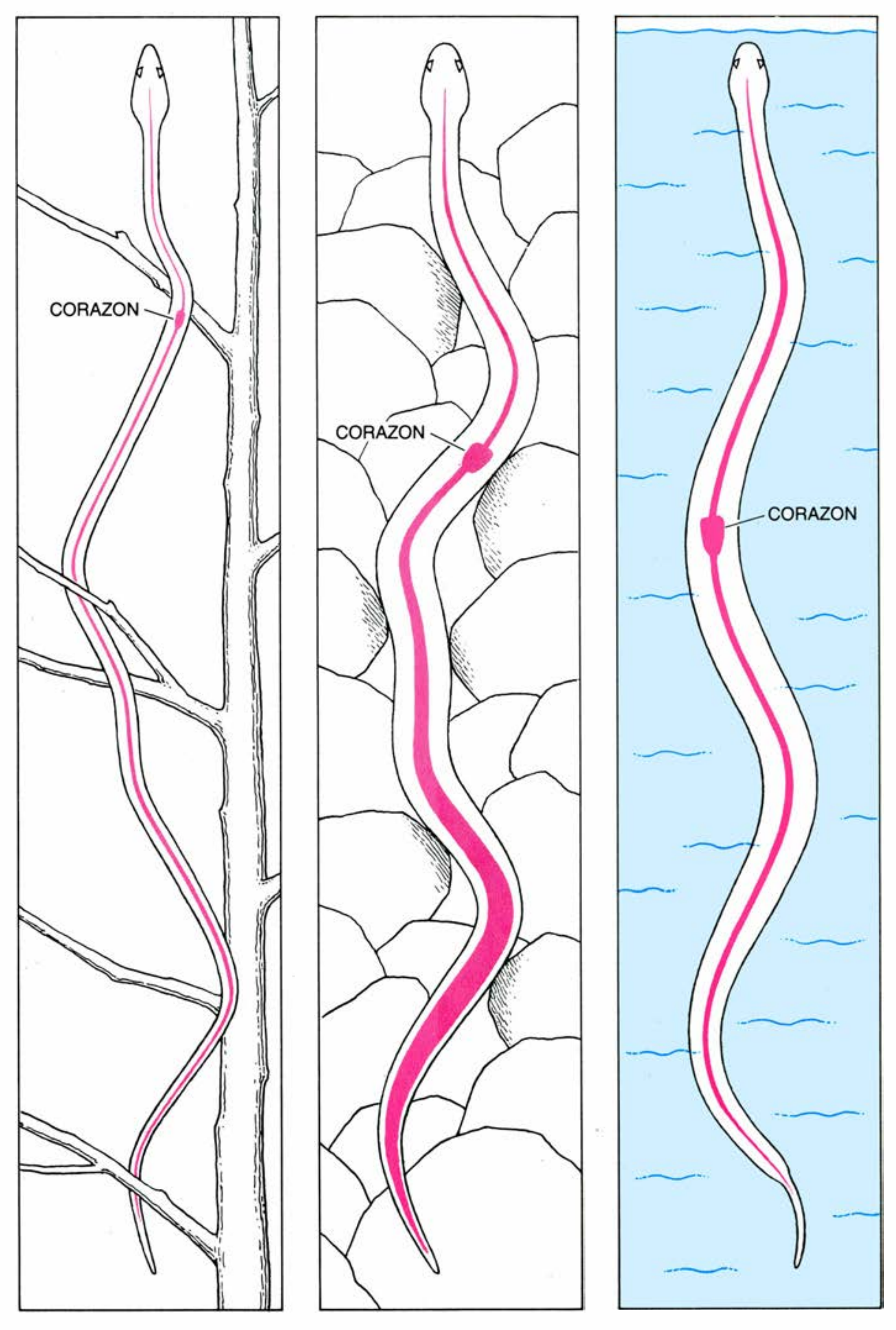
posición vertical. ¿Por qué, me pregunté, una serpiente de gran longitud no sufre un desvanecimiento mientras sube por un árbol? Tuve la oportunidad de dedicarme a este tema mientras estuve como profesor visitante en la Universidad Monash en Australia. Allí colaboré con Roger S. Seymour, quien trabaja actualmente en la Universidad de Adelaida. Juntos iniciamos un análisis comparativo sobre los efectos de la gravedad en las presiones sanguíneas de las serpientes. Estudiamos serpientes marinas, que al encontrarse rodeadas de agua son virtualmente inmunes a los efectos de la gravedad; serpientes terrestres no trepadoras, que viven en el suelo y están habitualmente en posición horizontal, y serpientes arbóreas, que adoptan a menudo una posición vertical al subir o bajar por los árboles.

Las serpientes marinas (parientes cercanos de las cobras y de las serpientes coral) habitan en zonas tropicales del Océano Pacífico y son especialmente abundantes en los arrecifes coralinos que rodean Australia, donde pueden ser capturadas mediante mangas. En el océano son sustentadas por el agua salada, cuya densidad es casi igual a la de la sangre. Sostenidas por el peso del agua, las serpientes pueden ajustar su volumen pulmonar hasta ser auténticamente ingrávidas, casi lo mismo que objetos flotando en el espacio exterior. En teoría, la circulación de la sangre en estas serpientes acuáticas es muy poco afectada por la gravedad. La razón estriba en que los gradientes verticales de presión en los vasos sanguíneos están contrarrestados por gradientes similares en la presión del agua circundante; por tanto, la gravedad no tiende a expandir las paredes de los vasos, y la distribución de la sangre permanece casi inalterada con independencia de la orientación.

Las serpientes marinas son descendientes de antepasados terrestres. En consecuencia, nos preguntamos si retendrían alguna capacidad fisiológica para contrarrestar la presión gravitatoria cuando son apartadas del medio donde viven normalmente. Se capturaron algunos ejemplares y se trasladaron al laboratorio enfriadas con hielo picado y ligeramente anestesiadas. Se insertaron uno o más catéteres, tubos flexibles llenos de suero fisiológico, en sus vasos sanguíneos para medir los cambios de presión. Antes de que recuperaran la movilidad, se introdujeron en largos tubos de plástico sujetos a un eje central.



1. SERPIENTE DEL MAIZAL *ELAPHE GUTTATA*. Tiene el cuerpo largo y fino, típico de muchas especies arbóreas y semiarbóreas. Sin un cuerpo delgado y un sistema circulatorio adaptado específicamente para afrontar los cambios de presión debidos a la gravedad, una serpiente de esta longitud no podría en absoluto mantener una circulación adecuada de la sangre mientras permaneciera en esta posición vertical.



2. EFECTOS DE LA ORIENTACION VERTICAL sobre el sistema circulatorio (*rojo*) de una serpiente trepadora; se comparan con los de una serpiente terrestre no trepadora y con los de una serpiente marina. Debido a que el corazón de una serpiente trepadora (*a la izquierda*) se encuentra situado cerca de la cabeza, el cerebro se mantiene bien abastecido de sangre. La acumulación de sangre en la cola es insignificante a causa del cuerpo estrecho del animal y de su piel ajustada. En la serpiente terrestre (*centro*), que habitualmente no trepa, aunque se muestre aquí en una pared rocosa vertical, el corazón ocupa una posición más próxima al punto medio del cuerpo. La acumulación de sangre es notable porque los vasos se distienden y se expanden en respuesta al aumento de presión en la parte inferior del cuerpo. De este modo, la sangre no circula con la eficacia reconocida en la serpiente arbórea. En la serpiente marina (*derecha*), el corazón se encuentra aproximadamente en el punto medio del cuerpo; la sangre no se acumula porque la tendencia de la presión sanguínea a distender los vasos se ve contrarrestada por la presión exterior del agua.

Girando los tubos desde la posición horizontal a distintos ángulos con la cabeza inclinada hacia arriba, medimos los efectos de la gravedad sobre el sistema cardiovascular de un animal. Utilizando un transductor electrónico de presión conectado a un catéter insertado en la aorta dorsal de la serpiente, registramos las presiones sanguíneas en el punto medio del cuerpo de la serpiente. Recordando la analogía con un tubo cerrado, esperábamos que una serpiente no adaptada a la gravedad perdería presión en su punto medio y sería incapaz de compensar la caída de presión en la cabeza. Monitorizamos la frecuencia cardíaca de cada serpiente por si el corazón pudiera compensar el defecto de la presión latiendo más rápidamente.

Los resultados fueron de interés. A medida que el ángulo de inclinación aumentaba, la presión en el punto medio de la serpiente disminuía, señal de que la sangre se iba acumulando en el extremo inferior de la serpiente. El corazón latió más deprisa, pero no fue suficiente para compensar la caída de presión, que al nivel del cerebro descendió hasta cero alcanzando incluso valores negativos. Presuntamente, los vasos sanguíneos anteriores se habían colapsado y no podían seguir facilitando el flujo de sangre adecuado en la orientación en que estaban.

Cuando se repitió el mismo ensayo con serpientes terrestres, los resultados fueron totalmente distintos. Experimenté con la serpiente tigre *Notechis scutatus*, considerada por algunos taxónomos miembro de la misma familia (*Elapidae*) en la que las serpientes marinas están clasificadas. Las serpientes tigre son endémicas de Australia, donde ocupan un amplio rango de hábitats que incluyen marismas y pluviselva. Cuando se inclinaron estas serpientes con la cabeza hacia arriba, la presión sanguínea aumentó en el punto medio del cuerpo. Como consecuencia, la presión craneal sólo disminuyó ligeramente y no se apreciaron señales de fallo circulatorio. Evidentemente, las serpientes terrestres han desarrollado diversos mecanismos fisiológicos mediante los cuales pueden regular la presión de la sangre.

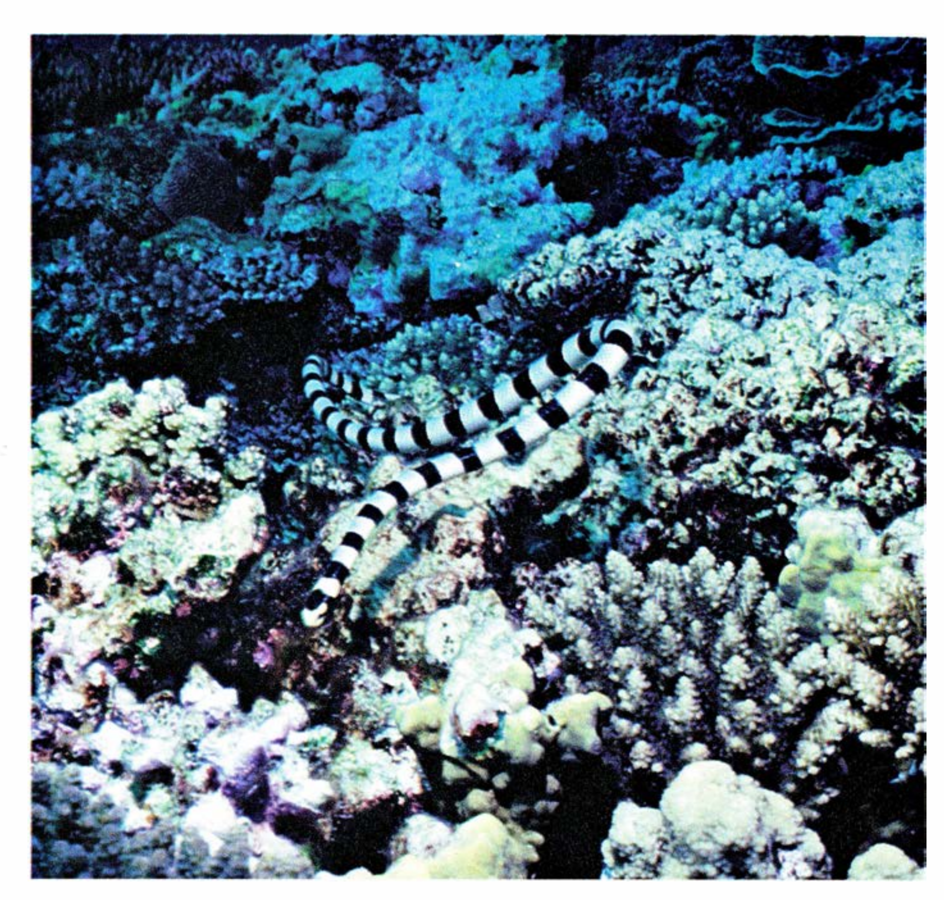
Desde que se realizaron estos experimentos iniciales hemos encontrado que la facultad para regular la presión sanguínea, aunque está presente en todas las serpientes terrestres, varía de acuerdo con el hábitat de la serpiente. Las arbóreas poseen mayor capacidad para regular la presión en posición vertical que, por ejemplo, las especies no trepadoras. Estas diferencias se reflejan también en los valores normales de presión arterial de las distintas especies.

Seymour y yo determinamos los valores de presión sanguínea en reposo correspondientes a varias especies y descubrimos que podíamos relacionar coherentemente la presión de la sangre de una serpiente con su comportamiento y hábitat. En cinco o seis especies arbóreas que investigamos, la presión arterial en posición horizontal oscilaba entre los 50 y 90 milímetros de mercurio, mientras que en cinco o seis especies acuáticas estudiadas la presión de la sangre fue muy inferior, fluctuan-

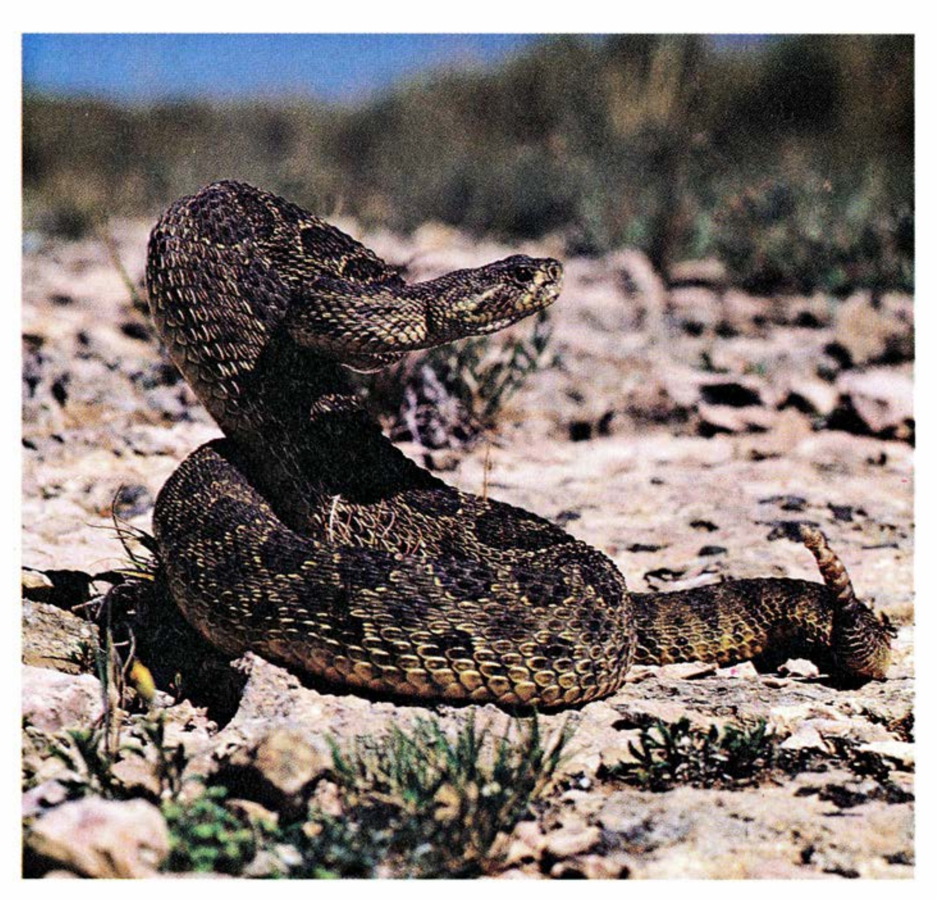
do desde quince hasta 39 milímetros de mercurio. Especies semiacuáticas, como las serpientes marinas que realizan la puesta de huevos en tierra, y las del tipo de serpientes terrestres no trepadoras como la serpiente cascabel tenían valores intermedios de presión arterial.

Parece razonable admitir que las presiones sanguíneas elevadas de las serpientes arbóreas son, en gran parte, una consecuencia secundaria del mejor tono muscular en los vasos de estas especies. Los músculos vasculares, causando la constricción de los vasos sanguíneos, incrementan la resistencia de éstos al flujo de sangre y elevan así la presión. Sea cual fuere la causa, presiones sanguíneas superiores minimizan la posibilidad de que la gravedad deteriore el flujo cerebral de sangre cuando la serpiente está con la cabeza hacia arriba. Por ejemplo, si la caída pasiva de presión causada por el cambio de inclinación es de 39 milímetros de mercurio al nivel de la cabeza de una serpiente marina de un metro de longitud, cuando la serpiente está fuera del agua, sus vasos craneales pueden cerrarse, mientras que los de una serpiente arbórea continuarán manteniendo una presión de 11 a 51 milímetros de mercurio. (Debe tenerse en cuenta que en este ejemplo, a la presión normal, la presión en situación de reposo descrita anteriormente, únicamente se le resta el cambio pasivo de presión gravitatoria causado por la inclinación. En el ejemplo no se tienen en consideración la actividad de bombeo cardíaco y otros factores.)

Después de establecer que la presión de la sangre de una serpiente varía en relación con su ecología, quise estudiar la disposición ("susceptibility") de diferentes especies a la acumulación sanguínea; pude hacerlo midiendo las variaciones del volumen de la cola de una serpiente durante la inclinación. Trabajando en la Universidad de Kansas, introduje la cola de la serpiente en un pequeño tubo y cerré éste herméticamente impidiendo el paso de aire. Coloqué entonces a la serpiente en el interior de un tubo de plástico mayor sujeto a un eje central similar al utilizado en Monash. Se conectó el tubo pequeño a un pletismógrafo, instrumento que registra las variaciones de volumen a través de los cambios de presión asociados. A medida que el volumen de la cola de la serpiente aumenta (debido a la acumulación de la sangre), la presión de aire en el tubo se eleva y es leída me-



3. SERPIENTE MARINA nadando libremente en el Océano Pacífico cerca de Fiji. Sostenida por el agua de mar, la serpiente está substancialmente desprovista de peso y se muestra inmune a los efectos de la gravedad. Sin embargo, si se saca del agua y se mantiene verticalmente, puede sufrir un fallo circulatorio.

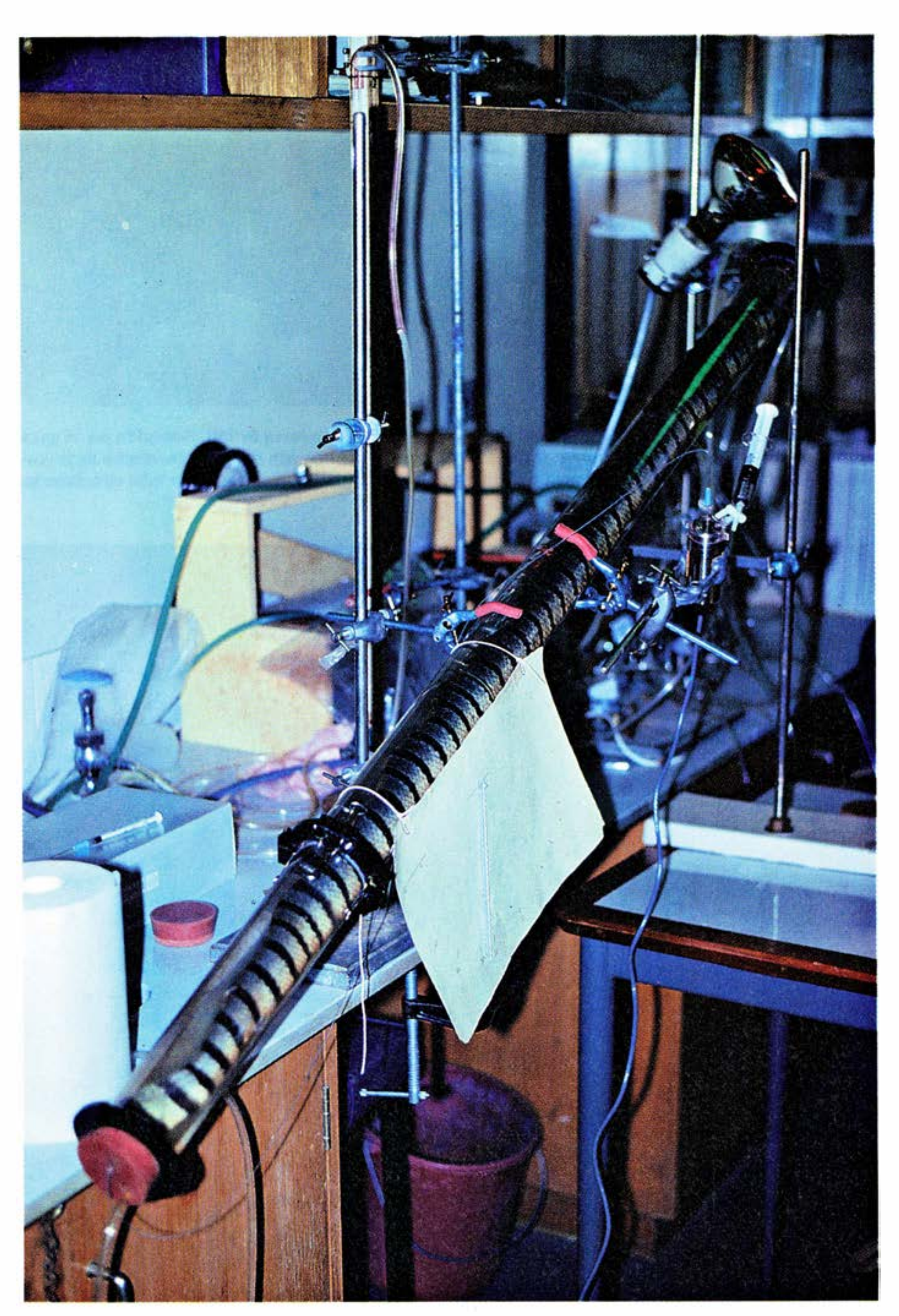


4. SERPIENTE CASCABEL *CROTALUS VIRIDIS*; lo mismo que otras muchas serpientes terrestres, adopta ocasionalmente una posición vertical, como cuando se prepara para atacar. Su sistema circulatorio es capaz de adaptarse, al menos temporalmente, a los cambios de presión gravitacional resultantes.

diante el pletismógrafo como un cambio porcentual de volumen.

En las serpientes que tienen un sistema pobre de control fisiológico sobre la presión de la sangre, la posición de cabeza levantada condujo a la acumulación de sangre y al aumento del volumen de la cola; en las que ejercen un control suficientemente eficaz, el volumen de la cola sólo varió ligeramente. Los datos de estos experimentos indican que la acumulación de sangre en las serpientes arbóreas es, por lo menos, un 30 por ciento menor que en las acuáticas y que en las terrestres no trepadoras. En las serpientes marinas se produce una concentración masiva de sangre en la parte posterior del cuerpo. La acumulación explica por qué la presión de la sangre disminuye en el punto medio del cuerpo durante la inclinación cabeza arriba en estas serpientes. La acumulación reduce el retorno venoso de sangre al corazón, con lo que disminuye el gasto cardíaco causando una caída de la presión sanguínea central.

Amplié estos estudios con otra serie de experimentos realizados en la Universidad de California en San Diego en colaboración con Kim P. Gallagher. Inyectamos, en serpientes ratoneras semiarbóreas, microsferas marcadas radiactivamente —pequeñas cuentas de 25 micras (milésimas de milímetro) de diámetro— que se alojan en los capilares en número proporcional a la intensidad del flujo sanguíneo que reciben. La radiactividad en distintos tejidos se compara entonces con la de la sangre extraída de una arteria. Las comparaciones nos permitieron determinar el volumen de sangre circulante en diferentes órganos.



5. APARATO ROTATORIO: un tubo de plástico en el que la serpiente puede inclinarse. Se muestra aquí una serpiente marina con la cabeza hacia arriba en un ángulo de 45 grados. Un transductor de presión conectado a un catéter, insertado en la arteria aorta dorsal, mide la presión sanguínea en el punto medio del animal; cuando lo inclinamos, la presión disminuye: la sangre se acumula en la mitad inferior del cuerpo.

Encontramos, por ejemplo, que cuando se inclina cabeza arriba a un ángulo de 45 grados una serpiente ratonera, el flujo sanguíneo en muchos órganos y músculos de la mitad posterior del cuerpo se reduce, mientras que el flujo en órganos críticos anteriores, como el pulmón, corazón y cerebro, no se modifica substancialmente. La reducción selectiva del flujo circulatorio es el resultado de una vasoconstricción: la contracción de las fibras musculares lisas de las paredes de los vasos sanguíneos. Estrechando selectivamente algunos vasos sanguíneos (predominantemente de la parte posterior del cuerpo en este caso), la vasoconstricción eleva la presión en el punto medio de la serpiente y favorece el flujo circulatorio hacia los tejidos en los que los vasos están menos constreñidos. En el hombre y otros mamíferos de talla elevada se produce un fenómeno similar, cuando se levantan súbitamente tras estar en posición horizontal.

Me he centrado en los cambios fisiológicos que tienen lugar cuando las serpientes adoptan una posición cabeza arriba. Debe recordarse, por supuesto, que algunas serpientes también adoptan posiciones cabeza abajo, en especial cuando descienden verticalmente o cuelgan de la rama de un árbol. ¿Cómo se mantiene el flujo de sangre en la cola y cómo se evita una presión craneal excesiva cuando una serpiente se orienta con su cabeza hacia abajo?

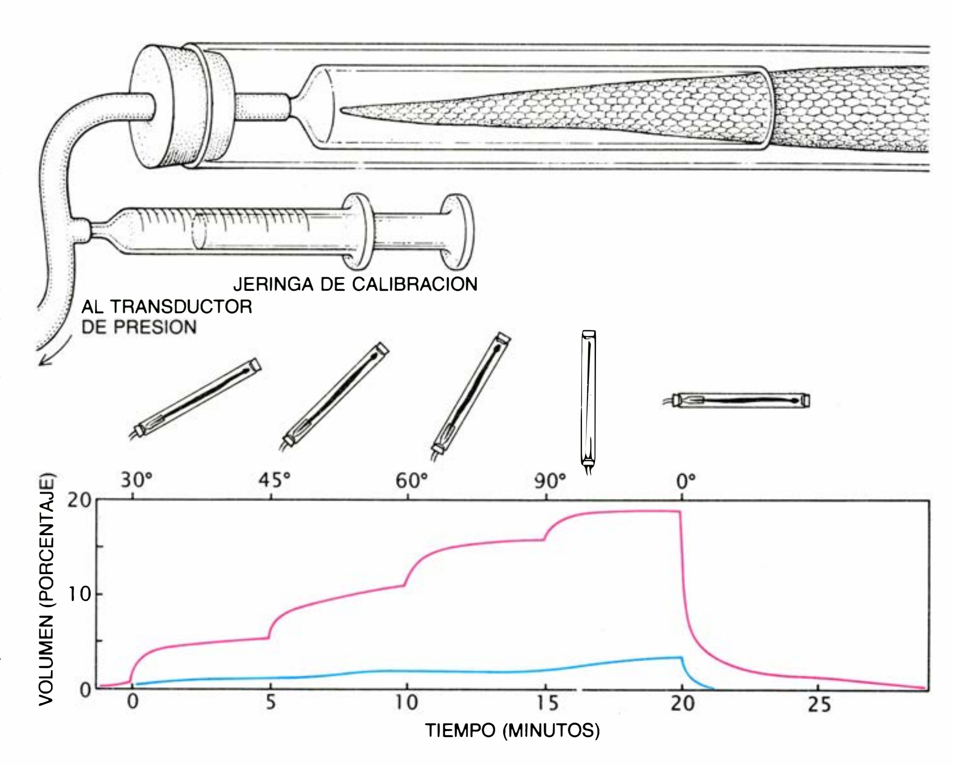
Los ajustes cardiovasculares son básicamente los opuestos. La frecuencia cardíaca de la serpiente disminuye y el músculo liso que envuelve los vasos sanguíneos se relaja en distintos tejidos, compensando parcialmente el aumento gravitatorio de presión en las proximidades de la cabeza. Debido a que el volumen venoso de la cabeza es pequeño comparado con el del extremo posterior del cuerpo, y a que la cabeza

está incluida en un cráneo duro, la acumulación es insignificante.

Las serpientes se han adaptado de otras formas a sus variados hábitats. Algunos aspectos anatómicos, como la posición del corazón, están también en consonancia con sus diversas formas de vida. Las serpientes (al haber perdido sus extremidades) carecen de cintura torácica o escapular y en consecuencia no tienen las mismas limitaciones en cuanto a la posición del corazón que la mayoría de los tetrápodos. En los mamíferos, por ejemplo, los huesos relacionados con la cintura escapular confinan el corazón a la cavidad torácica. Pero en las serpientes los extremos de las costillas están expeditos y la cavidad corporal cilíndrica, cuan larga es, no está obstaculizada por estructuras óseas. En consecuencia, en las serpientes acuáticas el corazón puede estar próximo a la mitad del cuerpo, posición que minimiza el trabajo implicado en el movimiento de la sangre hacia los extremos del cuerpo; en las especies terrestres no trepadoras el corazón suele hallarse a una cuarta parte de la longitud del cuerpo, desde el extremo de la cabeza; en las serpientes arbóreas, la distancia media desde el extremo de la cabeza es sólo del 15 por ciento de la longitud total del cuerpo. La reducción de la distancia entre el corazón y la cabeza contribuye a garantizar que el cerebro es adecuadamente perfundido por la sangre prescindiendo de la orientación del cuerpo.

John Donald, becario postdoctoral en mi laboratorio, demostró recientemente que los vasos sanguíneos que ocupan una posición posterior con respecto al corazón en las serpientes ratoneras y en otras especies arbóreas están densamente inervados, mientras los vasos anteriores al corazón lo están de forma considerablemente menor. Puede haber inervaciones de diferentes tipos en ambos grupos de vasos, pero se ignora su función precisa. El modelo de asociación entre los nervios y los vasos sanguíneos sugiere, sin embargo, que los nervios desempeñan un papel importante en la regulación del tono de las paredes musculares de los vasos, particularmente el de los vasos posteriores, los más susceptibles a la acumulación de sangre.

Los nervios que controlan la vasoconstricción están, en la mayoría de los animales, conectados mediante circuitos reflejos a receptores sensoriales especiales: los barorreceptores. Todavía no se ha identificado la localización exacta de los barorreceptores en las serpientes, pero se cree que se encuentran tanto en el interior como cerca del corazón, como ocurre en la mayoría de los vertebrados en que se han identificado. Los barorreceptores inervan las paredes de los vasos, donde son estimulados cuando la presión en el interior de los mismos aumenta y la pared vascular empieza a distenderse. Impulsos nerviosos procedentes de los barorreceptores modulan la frecuencia cardíaca y causan la contracción del músculo liso de las paredes de los vasos mediante un arco reflejo en el que interviene el cerebro. Las acciones combinadas del corazón y del músculo liso sirven para restituir el valor de la presión arterial a su nivel regulado; este tipo de control se denomina retroalimentación negativa.

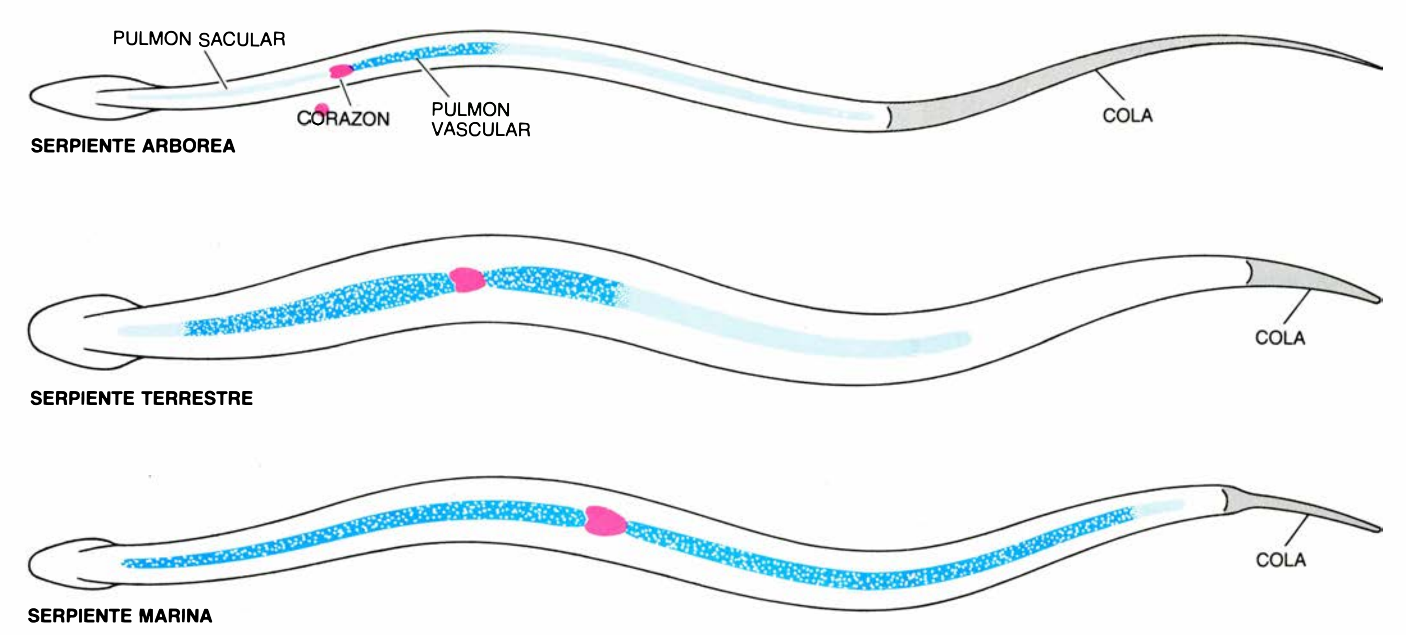


6. PLETISMOGRAFO para medir el incremento de volumen corporal debido a la acumulación de la sangre. Se introduce la cola de la serpiente en un tubo pequeño, que se cierra herméticamente y se conecta a un transductor que registra los cambios de presión. El experimentador puede modificar la presión aumentando o disminuyendo el volumen en una determinada proporción mediante el émbolo de una jeringa de calibración. Los cambios de presión en el interior del tubo son de esta forma calibrados y los resultados se registran en un gráfico como el que se muestra en la parte inferior. Una serpiente cascabel (*C. viridis*), que no está adaptada para trepar, muestra un incremento considerable en el volumen de la cola, debido a la acumulación de sangre a medida que el ángulo de inclinación aumenta (*en color rojo*). En contraste con ello, una serpiente indigo (*Pituophis melanoleucus*), que trepa frecuentemente, experimenta un incremento mínimo en el volumen de la cola (*en color azul*). Cuando se devuelven las serpientes a la posición horizontal, el volumen de la cola decrece repentinamente; ello nos pone de manifiesto que por lo menos el setenta y cinco por ciento del fluido no se acumula en los vasos sanguíneos, ni tampoco se filtra, saliendo de éstos, hacia los espacios tisulares.

La localización probable de los barorreceptores en el corazón o cerca de él sugiere otra ventaja más de la situación anterior del corazón en las serpientes arbóreas. Los efectos más acusados de la presión gravitatoria corresponden a los extremos de la serpiente; en consecuencia, cuanto más próximos a la cabeza estén situados los barorreceptores, más efectivos serán en el control de las perturbaciones gravitacionales y en preservar la función cerebral.

Debe mencionarse dos pequeñas desventajas de tener un corazón tan insólitamente próximo a la cabeza. Primera: cuando una serpiente arbórea está cabeza abajo, puede tener problemas para mantener el flujo de sangre en la cola (aunque el flujo sanguíneo en la cola es mucho menos crítico que en el cerebro); segunda: siempre que está con la cabeza hacia arriba, la sangre debe recorrer desde la cola casi toda la longitud de la columna venosa en sentido contrario al de la fuerza de la gravedad para su retorno al corazón. ¿Cómo se logran superar estos inconvenientes?

Contrariamente a lo que ocurre en los mamíferos, las venas de las serpientes no poseen válvulas internas para evitar el flujo retrógrado. Antes bien, el flujo ascendente se apoya en tres mecanismos: contracciones del músculo liso vascular mediadas por barorreceptores, movimientos del músculo esque-



7. VARIACION DE LA ANATOMIA DEL PULMON según el hábitat de la serpiente. El pulmón de las serpientes arbóreas (*arriba*) posee una corta región (*azul oscuro*) vascular (es decir, rica en vasos sanguíneos) tras el corazón del animal (*rojo*). Hacia ambos extremos el pulmón se diferencia en prolongadas regiones de tipo sacular (*azul claro*), que carecen de vasos sanguíneos que participen en el intercambio gaseoso. El pulmón en las serpientes terrestres (*centro*) tiene una región vascular algo más larga cerca del corazón. En las marinas (*abajo*) el pulmón está constituido, casi en su totalidad, por tejido vascular.

lético, que comprime las venas de las serpientes, y piel firme. Las serpientes arbóreas que han estado trepando durante algún tiempo hacen con frecuencia una breve pausa para ondear sus cuerpos, originando, con las contracciones musculares, ondas propagadas que avanzan desde la parte posterior del cuerpo hacia la cabeza. Las contracciones al progresar comprimen las venas, impulsando la sangre hacia adelante y aumentando la presión venosa central en la zona del corazón. Dicho comportamiento mejora el flujo venoso hacia el corazón de forma que éste pueda mantener la presión arterial.

Un comportamiento similar puede inducirse en el laboratorio. Cuando experimentalmente extraje a serpientes ratoneras entre el 30 y el 50 por ciento de su volumen total de sangre, disminuyendo así su presión arterial un promedio de un 36 por ciento por debajo de su valor normal, los animales reaccionaron mediante ondeo. Esta respuesta de ondeo incrementó, a su vez, la presión craneal hasta alcanzar valores aproximadamente normales. El comportamiento de ondeo, debido a que no puede ser inducido de forma similar en las serpientes acuáticas, parece haber evolucionado específicamente para auxiliar a la circulación de la sangre en las serpientes que ocupan hábitats arbóreos. Otros movimientos corporales favorecen también la circulación, pero normalmente no elevan la presión sanguínea con la eficacia mostrada por el ondeo típico.

El tipo corporal parece constituir también un factor importante a la hora de contrarrestar la presión gravitatoria. Las serpientes especializadas para la vida arbórea tienden a tener cuerpos esbeltos con tono muscular firme y piel fuertemente adherida. El pequeño perímetro corporal y los tejidos firmes soportan la tensión causada por la acumulación de la sangre. Los trajes *g* que utilizan los pilotos de combate en las maniobras de vuelo a alta velocidad funcionan de la misma forma. De manera similar, los mamíferos de talla elevada, como el hombre, el caballo y la jirafa tienen pieles tensas y tejido conjuntivo que envuelve la parte inferior de sus extremidades, lo que contrarresta la tendencia hacia la vasodilatación, mientras que los mamíferos de pequeña talla como los conejos carecen de estos elementos.

Las serpientes acuáticas y las terrestres no trepadoras, cuyos sistemas cardiovasculares, si es que están expuestos a la presión gravitatoria, lo están de forma mínima, tienen cuerpos más fláccidos y pieles más laxas. La relación entre el perímetro corporal y la longitud total en la serpiente terrestre no arbórea *Python regius* es tres veces mayor que en su pariente arbórea *Corallus enhydris*. Pueden encontrarse correlaciones similares entre anatomía y hábitat entre especies de otras familias. Entre los colúbridos, a los que pertenecen muchas de las serpientes más comunes en Norteamérica como las *Thamnophis* spp. y *Lampropeltis* spp., las formas arbóreas pueden llegar a ser hasta 10 veces más delgadas que sus parientes terrestres.

La forma y el tamaño del pulmón de la serpiente refleja también su hábitat y su comportamiento. Muchos de los tejidos del cuerpo son sensibles a la formación de edemas como consecuencia de la presión gravitatoria, pero pocos tienen mayor probabilidad que los pulmones de resultar seriamente dañados por la retención de fluido. La razón consiste en que el fluido, que se acumula en los pulmones, aumenta la distancia de difusión entre el aire y la sangre y de este modo reduce el transporte de gases respiratorios. Para reducir la filtración de fluido en el tejido pulmonar, la presión sanguínea en todos los vertebrados tetrápodos, incluyendo a las serpientes, es menor en los pulmones que en el resto de tejidos corporales.

La evolución de la mayoría de los pulmones de las serpientes hacia una sola cámara membranosa y alargada no representa un problema en posición horizontal, pero un pulmón largo crea complicaciones especiales en las especies arbóreas. El intercambio gaseoso tiene lugar a través de sacos radiales (análogos a los sacos alveolares de los mamíferos) en las esponjosas paredes membranosas del pulmón. La región en donde tiene lugar el intercambio gaseoso está abundantemente provista de vasos sanguíneos y es conocida como pulmón vascular. El resto del pulmón,

que se extiende hasta distintas longitudes, según las especies, puede estar totalmente desprovisto de vasos sanguíneos implicados en el intercambio gaseoso y se denomina pulmón sacular.

En una serpiente orientada verticalmente, la gravedad incrementa la presión tanto en las arterias como en las venas, que forman una columna continua de fluido, que se extiende a lo largo del pulmón vascular. Estas presiones se transmiten a los capilares, colocando al pulmón en situación de edema grave. Debido a que el riesgo de edema se incrementa en proporción directa con la longitud de la vascularización pulmonar, el reducir la longitud de los vasos pulmonares parecería la mejor solución para la presión gravitatoria. El examen de la anatomía pulmonar en distintas serpientes confirma que la longitud de la parte vascular varía según el hábitat.

En las serpientes acuáticas el tejido vascular se extiende a lo largo de casi toda la cavidad corporal (aunque algunas especies presentan un pequeño extremo sacular). En las especies arbóreas, el tejido vascular es mucho más corto y puede ocupar menos del 10 por ciento de la longitud del cuerpo, prolongándose un corto espacio tras el corazón. La consecuencia de un pulmón vascular corto es que los vasos sanguíneos pulmonares de las serpientes arbóreas no están expuestos a presiones gravitatorias significativas, ni siquiera cuando las serpientes se hallan orientadas verticalmente. Los pulmones vasculares de las especies terrestres no trepadoras y de las semiacuáticas presentan, por lo general, un tamaño intermedio.

Para demostrar los efectos de la gravedad sobre el pulmón de una serpiente acuática, efectué medidas de la presión sanguínea pulmonar en la serpiente marina olivácea, *Aipysurus laevis*. Las serpientes fueron anestesiadas y se insertaron catéteres en sus vasos pulmonares. Cuando se hubo disipado la anestesia, se colocó cada serpiente en un tubo giratorio de plástico y sin agua. Como se predijo, las presiones de sangre aumentaron en las zonas inferiores del pulmón a medida que el ángulo de inclinación crecía. Los exámenes microscópicos subsiguientes del tejido pulmonar de estas serpientes aportaron pruebas de la presencia de un grave edema y asimismo de la rotura de capilares en la zona inferior del pulmón. Cuanto mayor fue el ángulo de inclinación —y en consecuencia la altura de la columna vertical— mayor fue la lesión. Cuando las serpientes fueron inclinadas manteniéndolas en agua salada, no se apreció ninguno de estos efectos. En su ambiente acuático habitual, la serpiente evita el edema, incluso cuando nada en posición vertical, debido a que la presión del agua colapsa porciones del pulmón y reduce la longitud de la columna de sangre expuesta al gas pulmonar. (Partes del pulmón se colapsan porque el gas pulmonar es comprimido a medida que la presión gravitatoria del agua de mar en que se encuentra aumenta.)

Estas experiencias fisiológicas muestran que las serpientes, debido a su forma alargada y a la diversidad de sus hábitats, constituyen valiosos modelos para el estudio de la regulación y diseño cardiovascular. En particular, la adopción de hábitos arbóreos ha precisado de cambios anatómicos y fisiológicos, varios e importantes. El corazón se ha desplazado a una posición más anterior y el pulmón vascular ha visto reducida su longitud; la presión sanguínea está más rigurosamente regulada, los vasos sanguíneos muestran modelos especializados de asociación con los nervios; existe una reducción de la expansibilidad y del perímetro de la pared corporal, y comportamientos especializados mejoran el flujo venoso hacia el corazón. A juzgar por sus sistemas cardiovasculares, las serpientes son animales altamente especializados y bien adaptados. Quizá la comprensión de sus mecanismos de regulación cardiovascular ayude a los fisiólogos a entender cómo la gravedad afecta a los seres humanos, particularmente en el contexto de los viajes espaciales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE BIOLOGY OF SEA SNAKES. Dirigido por W. A. Dunson. University Park Press, 1975.

BLOOD PRESSURE IN SNAKES FROM DIFFERENT HABITATS. Roger S. Seymour y Harvey B. Lillywhite en *Nature*, vol. 264, n.º 5587, págs. 664-666; 16 de diciembre de 1976.

SNAKES: ECOLOGY AND EVOLUTIONARY BIOLOGY. Dirigido por Richard A. Seigel, J. T. Collins y S. S. Novak. Macmillan Publishing Co., 1987.

CIRCULATORY ADAPTATIONS OF SNAKES TO GRAVITY. Harvey B. Lillywhite en *American Zoologist*, vol. 27, n.º 1, págs. 81-95; 1987.

SCALING OF CARDIOVASCULAR PHYSIOLOGY IN SNAKES. Roger S. Seymour en *American Zoologist*, vol. 27, n.º 1, págs. 97-109; 1987.

Ingenieros de canales del Perú preinca

Los ingenieros de Chimor construían canales para transportar agua de los ríos a los campos situados a unos 70 kilómetros de distancia. Tenaces e implacables fuerzas geológicas se encargaron de destruirlos

Charles R. Ortloff

Hacer fluir el agua hacia abajo podría parecer la cosa más fácil del mundo. Pero cuando el caudal lo lleva un río situado a 40 kilómetros de los campos de riego, se convierte en una tarea difícil. Este es esencialmente el problema con el que se enfrentaban los antiguos ingenieros del reino de Chimor, una sociedad que dominó la costa norte de Perú desde el año 1000 d. C., aproximadamente, hasta su conquista por los incas. Chimor era una "sociedad hidráulica": en el árido paisaje de las estribaciones costeras andinas, los chimu dependían por entero del riego para producir el alimento necesario para el mantenimiento de su pueblo. Así se convirtieron en expertos ingenieros hidráulicos, capaces de diseñar con gran precisión trazados para canales y de construirlos con eficacia digna de admiración.

Según parece, los chimu necesitaban todos los conocimientos técnicos a su alcance, porque su entorno se transformaba de modo amenazador para los canales. Debido a la tectónica de placas y a los espasmódicos movimientos sísmicos de la costa sudamericana, los ríos que bajan de los Andes modifican continuamente su lecho en un paisaje en transformación. Para los chimu, el resultado final era que el caudal de la red de canales decrecía incesantemente, a medida que el río abastecedor atrincheraba y enarenaba las bocas de los canales. La situación se complicaba con las lluvias ruinosas que se desencadenaban con las alteraciones térmicas de El Niño y las corrientes oceánicas. Los ingenieros chimu, sin embargo, hacían frente a la situación. Durante cientos de años modificaron sus canales, innovando y adaptando nuevos proyectos estratégicos para mantenerse al mismo ritmo que el entorno físico. Sus logros han sido recientemente descubiertos en la primera excavación de vasto alcance en los canales de la región.

La región que en otro tiempo dominaron los chimu es una franja rectangular que se extiende a lo largo de la costa norte de Perú, desde la Cordillera Negra de los Andes hasta el Océano Pacífico. Su límite norte se sitúa cerca de la frontera meridional de Ecuador y su límite sur se sitúa aproximadamente a la altura de Lima. A lo largo de esta franja costera, muchos ríos excavan valles, desde los altiplanos andinos hasta el Pacífico; en estos valles fluviales, se ha concentrado siempre la agricultura. Aunque queda mucho por conocer sobre los orígenes de los chimu, se sabe que fueron eficaces conquistadores; durante algún tiempo después del comienzo del segundo milenio, en el 1000 d. C., habían llegado a dominar a todos los otros pueblos de los valles costeros adyacentes. El corazón de este imperio se centraba en el valle del río Moche, donde se encontraba Chan Chan, la capital de los chimu.

En su momento culminante, la chimu era una comunidad agrícola dividida en varias clase sociales bien diferenciadas. En la cima se hallaba el rey con su séquito. Le seguía la nobleza, no muy numerosa. Por debajo de los nobles, había una clase urbana tripartita, compuesta por criados, artesanos (trabajadores del metal, la cerámica y otros materiales) y transportistas. Estos grupos se concentraban fundamentalmente en Chan Chan. Fuera de la capital, había una clase baja rural que incluía a los trabajadores del campo que suministraban la base de la subsistencia.

Según parece, la clase baja rural aportó la mano de obra para la construcción de los canales. La administración de Chan Chan exigía al pueblo un "impuesto laboral", que se utilizaba para construir canales, jardines ya desaparecidos y mejoras en la propia capital. Se cree que, una vez diseñado el curso del canal, se asignaban cuadrillas, formadas por 10 o 20 hombres, para excavar y remover las piedras del cauce. La cuadrilla trabajaba con herramientas de bronce y martillos de piedra. Se utilizaban azadas de piedra para cavar y cestas de mimbre para transportar la tierra. Las piedras de mayor grosor sufrían sucesivas reducciones encendiendo fuego a su alrededor y arrojándoles luego agua para resquebrajarlas.

Una vez construidos así, los canales traían agua principalmente de noviembre a mayo, que es la estación lluviosa en los altiplanos. Esta forma de suministro era suficiente para abastecer una amplia gama de cosechas: fríjoles, maíz y calabazas de varios tipos, especias y muchas clases de árboles frutales, junto con algodón. Los cultivos se realizaban en campos surcados en serpentina, ceñidos al trazado del canal, a una altura ligeramente inferior. Bocas de derivación llevaban el agua hasta los campos de labor. Esos canales secundarios se

CHARLES R. ORTLOFF conjuga la experiencia profesional de ingeniero con su interés por la arqueología. Ingeniero aeronáutico por el Instituto Politécnico de Nueva York, realizó su tesis doctoral sobre mecánica de fluidos, mecánica aplicada y termofísica en la Universidad de California en Los Angeles. Tras una corta dedicación a la universidad, pasó a la industria. Hoy es el ingeniero jefe del laboratorio central de la empresa F. M. C. Es, además, investigador vinculado al Museo Field de Historia Natural de Chicago y al Museo de Historia de la Cultura de la Universidad de Los Angeles.

regulaban mediante compuertas estacionales que elevaban el nivel del agua hasta presas con estructura en pendiente y, de esta manera, distribuían el agua de riego por los cultivos.

Los ingenieros chimu construyeron muchos canales siguiendo este plan general. En este artículo me centraré en los dos más cercanos al corazón de Chimor: el sistema del valle de Moche y el canal de Entrevalles, que traía agua al valle de Moche desde el valle del río Chicama (el siguiente al norte del valle de Moche). La historia de estos dos sistemas está estrechamente vinculada al destino de la capital y, por tanto, de la sociedad chimu. Por otra parte, su evolución ilustra de manera excelente qué recursos desplegaban los constructores de canales en su intento de preservarlos contra los cambios impuestos por su entorno.

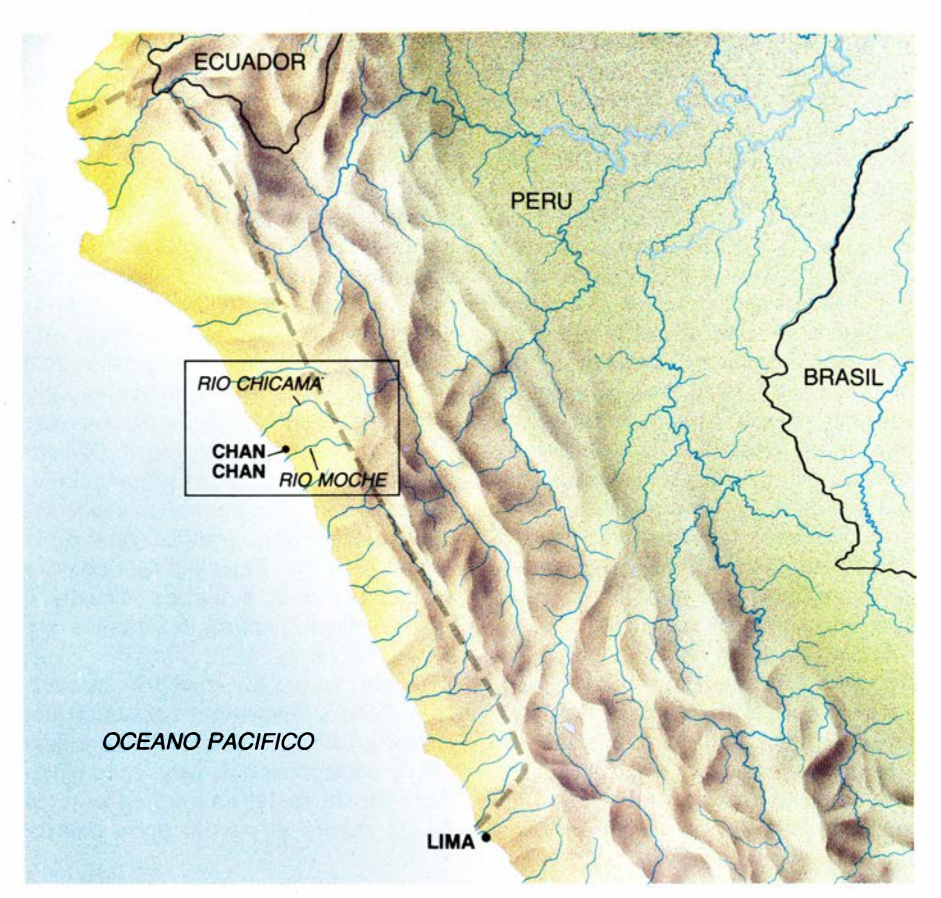
Quizás el más significativo de estos cambios fue la caída continua del nivel de caudal en los canales. Esa merma debíase, a su vez, a las interacciones entre las grandes placas tectónicas que teselan la superficie terrestre. Fuera mismo de la línea de costa de Sudamérica, la placa de Nazca se introduce bajo la placa Sudamericana, extensísima, en una zona de subducción, como dicen los geólogos. En virtud de la subducción, la costa oeste de Sudamérica sufre una elevación y deformación progresivas. A medida que la región costera se eleva, los ríos deben restablecer el equilibrio en la pendiente de su cauce; lo hacen, sobre todo, erosionando el limo que antes se había depositado. Según explicaré, tal reducción tiene consecuencias desastrosas para un sistema de canales basado en la gravedad. El levantamiento de la costa deforma también grandes segmentos de canal; canales que antaño llevaban agua gracias a la gravedad, discurren ahora cuesta arriba.

Otros factores medioambientales afectaron a los canales. La elevación de las playas del Pacífico dejó expuestas grandes cantidades de arena, que los vientos que soplaban en dirección al continente transportaron hacia el interior. La arena se amontonaba en enormes dunas que avanzaban cada año unos metros tierra adentro, creando un entorno "inflacionario". La arena, acarreada de nuevo hacia el mar por fuerzas peor conocidas, creaban un entorno "deflacionario". La cantidad total de arena depositada sobre el lecho rocoso podía variar considerablemente en unos centenares de años. Además, las inundaciones de El Niño, causadas por corrientes templadas de la costa, que adquieren su forma más rigurosa cada cincuenta años aproximadamente, desatan una tremenda fuerza destructora. En 1982, por ejemplo, cayeron 2300 milímetros de lluvia en una semana, arrasando la autopista Panamericana y dejando sin alimento grandes zonas de la región peruana. Tales lluvias hubieran significado una auténtica catástrofe para los canales chimu, levantados con bancos de tierra.

Se hizo frente a ese reto de la naturaleza con innovaciones graduales que persistieron largo tiempo. El primer estilo de construcción de canales en el valle de Moche se debe a los predecesores de los chimu: el pueblo de la cultura



1. CANAL DE ENTREVALLES, una de las mayores creaciones ingenieriles de los chimu. Este pueblo ocupó la costa septentrional de Perú antes de ser conquistado por los incas, en torno a 1450 d. C. El canal de Entrevalles serpentea a lo largo de 72 kilómetros, desde el valle del río Chicama hasta la depresión del río Moche, corazón del territorio chimu. Como muestra la fotografía, el canal discurre a lo largo de las estribaciones andinas con una ligera pendiente. Para mantener esta pendiente, fueron necesarias terrazas de tierra; en el centro se muestra una de ellas. Las lluvias torrenciales pusieron a prueba su eficacia.



2. REINO DE CHIMOR. Ocupaba la franja costera del norte de Perú, desde los Andes hasta el Oceano Pacífico. La línea discontinua señala la zona de dominio chimu en su época de apogeo, hacia el año 1300 de nuestra era cristiana. En esta región, la población humana se ha agrupado siempre en los valles de los ríos que bajan de los Andes. El agua de riego se puede conseguir en los ríos desde noviembre hasta mayo.



3. RED DE CANALES en las proximidades de Chan Chan, la capital chimu. Da fe de una merma constante en la disponibilidad de tierra de labor. Los canales más antiguos del valle de Moche eran "grandes zanjas" que surcaban en línea recta un paisaje arenoso. Se reemplazaron las zanjas por canales que seguían las curvas de nivel con ligera pendiente. Debido a la reducción de los lechos fluviales que resulta de las fuerzas de las tectónica de placas, las primeras tomas del canal en la cara norte del Moche (*N3*) y en la cara sur del mismo río (*S3*) acabaron enarenándose con el tiempo o elevándose por encima del nivel del agua, a pesar de las reiteradas modificaciones para recobrar el caudal fluvial. Fueron reemplazados posteriormente por nuevos sistemas (*S2*, *S1*, *N2*, *N1*) que abastecían de agua a extensiones agrícolas cada vez más restringidas.

Mochica, que alcanzó su apogeo entre el 100 y el 800 d. C. Estos primeros canales, o "grandes zanjas", eran trincheras hondas que atravesaban un paisaje inflacionario con mucha arena. El terreno, suavemente inclinado y lleno de arena, podía surcarse fácilmente con largas zanjas. Se construyeron muchas en el valle de Moche. Zanjas con tomas en el río Chicama regaban el norte del valle de Moche, incluidos los tramos más septentrionales de la Pampa Huanchaco, que formaba parte del área de Tres Pampas, región "granera" de crucial importancia, cerca de Chan Chan. Una zanja que partía del mismo río Moche regaba la Pampa Cacique y las zonas costeras cercanas a la antigua Mochica, capital de Moche.

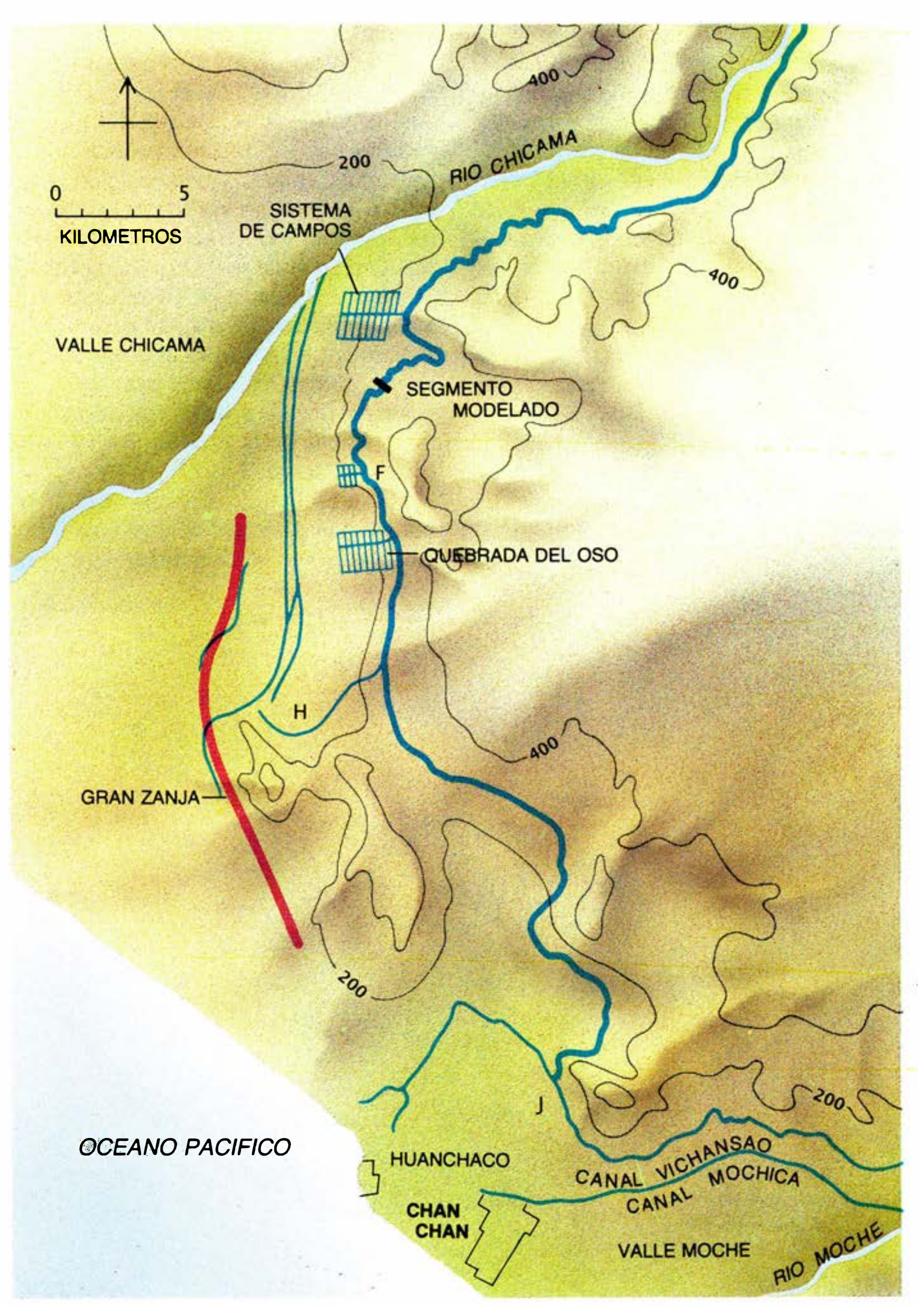
Sin embargo, conforme el levantamiento tectónico y la consecuente reducción de los lechos de los ríos continuaba, el sistema de largas zanjas resultaba menos viable. Ello sería motivo constante de preocupación para los ingenieros chimu hasta el final de su civilización. Los brazos que llevaban agua del río al canal estaban excavados en la vertiente del valle fluvial. A medida que el río se abría paso por su nuevo lecho, la boca de acometida quedaba cada vez más alta con respecto al fondo del río. El resultado era que el caudal del canal decrecía. Por último, la boca del canal podía enarenarse o quedar en alto y secarse.

En un sistema de zanjas, el problema se soluciona ahondando la boca de entrada del canal y posibilitando vuelva a fluir el agua. Ahora bien, no basta con rebajar la boca de entrada. Para que el agua fluya, debe rebajarse consecuentemente la zanja entera. Esa operación resultará eficaz durante algún tiempo, pero a la larga se convierte en un grave problema. Para que el agua llegue a los campos, el canal debe encontrarse por encima de la superficie de cultivo. Como un sistema de canales en zanja debe rebajarse repetidamente, se pierde para el regadío cada vez más tierra. Y, así, esa labor acaba por suprimir la agricultura en la región de la Pampa Cacique.

La solución al problema consistía en reemplazar los canales en zanja por un tipo de sistema completamente nuevo: canales que siguieran las curvas de nivel. Este tipo de canal se ciñe estrechamente a la topografía del terreno y permite mantener una inclinación pequeña y constante, a medida que desciende. En oposición al sistema de zanjas, los sistemas que siguen las curvas de nivel requieren habilidades especiales en los

ingenieros responsables para encontrar el curso correcto. Se precisan también "estructuras de relleno", como acueductos (que salven las quebradas o cañones abiertos por la erosión de la lluvia) y terrazas (para conducir fácilmente los canales a través de las laderas de las estribaciones andinas, muy accidentadas). Estas técnicas se introdujeron, probablemente, poco a poco a tenor de los contratiempos planteados por las nuevas circunstancias. Cuando todos los canales estuvieron en marcha constituyeron la base de un poderoso sistema sin precedentes.

Una de las claves de esta nueva canalización fue la colocación de la acometida lo más cerca posible del nacimiento del río. Cuanto más arriba se instalaba la toma, mayor era la zona de tierras en pendiente que podía ser irrigada por el sistema de canales. El punto más alto de toma se determinaba por la configuración rocosa de las estribaciones andinas. El utillaje elemental de herramientas de piedra y bronce de los chimu bastaba para excavar los blandos lechos fluviales depositados por el río, pero no servían para abrir cauce entre las montañas de granito. Por ello, el punto de toma más alto se encontraba en el río Moche, allí donde abandona la sierra y atraviesa el delta fluvial de su propio valle. Y allí se instalaron las tomas en la época en que los chimu construían los primitivos canales que seguían las curvas de nivel en su máxima altura. Estos sistemas de canales de alta elevación se encontraban a ambos lados del río Moche; el sistema del norte regaba la rica zona de Tres Pampas y el sistema del sur hacía lo propio con la Pampa Cacique.



4. RUTA DEL CANAL DE ENTREVALLES, trazada con el propósito de salvar el sistema del canal de Chimu, transvasando agua desde el río Chicama hasta el valle de Moche. El canal de Entrevalles se cruzó con el canal de Vichansao en la vertiente norte del valle de Moche (*punto J*), para mantener e incrementar el caudal en regiones agrícolas próximas a Chan Chan, que incluían las pampas de Huanchaco, Río Seco y Esperanza. Las tomas de alimentación regaban también los campos aledaños del canal (*como en el punto H*).

Los nuevos sistemas de canales que seguían las curvas de nivel recuperaron tierras que habían quedado abandonadas cuando fracasó el sistema de zanjas. Sin embargo, al igual que los canales de zanja, estos canales adaptados a la topografía eran vulnerables a la acción menguante del río. Esta última fomentaba la tendencia a enarenarse que padecían las tomas del sistema del norte y del sur. Puesto que las tomas se habían instalado intencionadamente en el curso alto del río, en los Andes, cuando se volvían inservibles no cabía otro remedio que trasladarlas curso abajo. Sin embargo, la geometría del valle fluvial, unida a los obstáculos del lecho rocoso del curso fluvial, determinó que sólo ciertos puntos del río resultaran idóneos para instalar allí una boca del canal que llevara el agua al valle. Las tomas del sistema del sur y del sistema del norte fueron trasladadas río abajo dos veces, en sendas fases de construcción, a medida que las tomas del curso superior se iban enarenando.

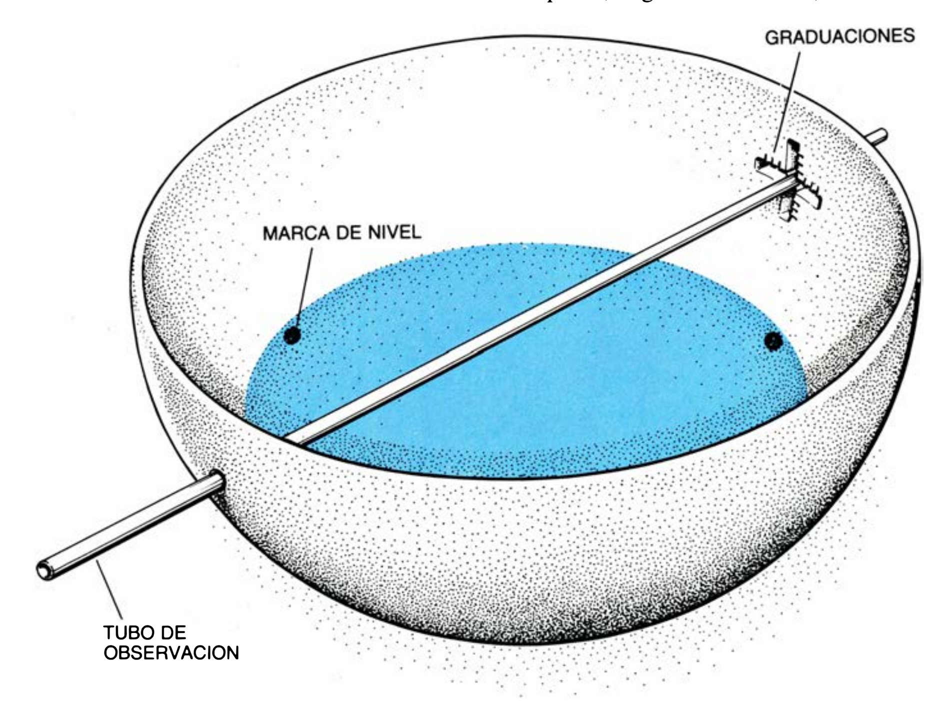
Cada vez que la acometida se trasladaba curso abajo, se perdía una superficie considerable de tierra para el cultivo: el sistema inferior no podía ya proporcionar agua a las zonas más altas que antes se regaban. Además, en la época del sistema final del norte, los chimu habían perdido tanta tierra que los ingenieros se vieron forzados a dirigir el agua de riego a zonas acotadas del propio Chan Chan y convertir en tierra de labranza lo que había formado parte del centro urbano. Sin embargo, antes de ceder a esa medida, utilizaron un recurso que ellos consideraron salvador: el canal de Entrevalles.

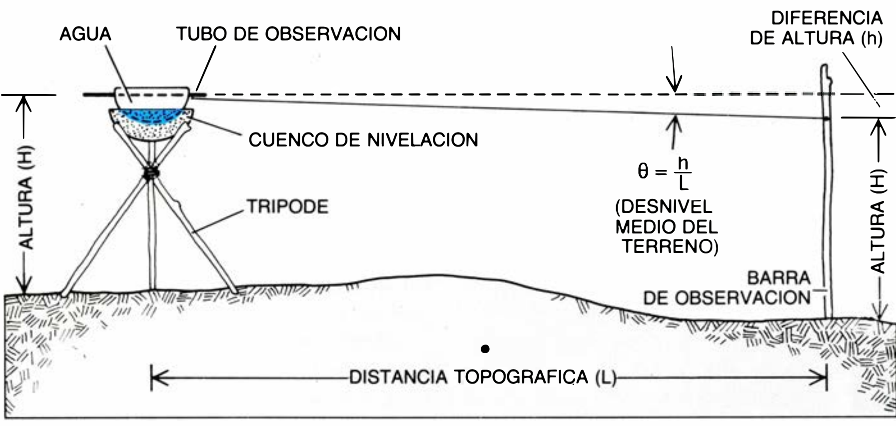
El canal de Entrevalles se extendía a lo largo de 74 kilómetros, desde el río Chicama hacia los sistemas de canales que seguían las curvas de nivel en la vertiente norte del valle de Moche. Uniendo el canal de Entrevalles con el sistema de canales existente, los ingenieros chimu confiaban en restablecer la producción agrícola en el área de Tres Pampas. Además, mediante la construcción de derivaciones especiales en pendiente del sistema de canaliza-

ción de la Pampa Huanchaco, próxima a Chan Chan, esperaban ampliar el área de cultivo que dependería del suministro hídrico aportado por el canal de Entrevalles. El caudal proyectado, en todo el sistema que cubría los valles, habría de satisfacer la demanda de agua de los campos de las Tres Pampas en sus momentos de pleno rendimiento. Aunque el Canal de Entrevalles prolongó su radio de acción hasta la Quebrada del Oso, por el sur, las alteraciones sufridas en su recorrido impusieron su abandono antes de que se estableciera la conexión con el canal de Vichansao. Por culpa de ello, se perdió la mayor parte de los campos de las Tres Pampas; sólo persistió la agricultura de ribera merced a un sistema de canalizaciones en el curso bajo del río.

El tránsito de los sistemas del valle de Moche a los del canal de Entrevalles dan testimonio de las prácticas innovadoras de los ingenieros chimu. El principal capítulo de innovaciones remite a la forma y construcción del canal, proceso que se revela con especial claridad en el de la Pampa Huanchaco, en las proximidades de Chan Chan. Las fases primitivas del sistema pertenecen, eso parece, a las zanjas abiertas en suelos de arena; los restos excavados revelan perfiles de sección transversal característicos de la erosión por agua en suelos de arena.

Hacia 1100 d. C., El Niño desató una inundación catastrófica que arrasó por completo, según los indicios, la red de canales de la Pampa Huanchaco, así como otros sistemas. El desastre ofreció a los ingenieros hidráulicos la oportunidad de reconstruir el sistema partiendo de nuevos planteamientos. Los segmentos reconstruidos son menos sinuosos que sus predecesores. Más aún, los nuevos canales presentaban un revestimiento rocoso y la luz de su cauce era menor que la de los anteriores.





5. DISPOSITIVO TOPOGRAFICO CHIMU, reconstruido por el autor, quien se inspiró en un artefacto del Museo Arqueológico de Huaraz, Perú. El dispositivo (*ilustración superior*) es un cuenco perforado por un tubo de observación hueco que atraviesa un pequeño agujero en un lado y una abertura cruciforme graduada en el opuesto. El cuenco se llena de agua y su orientación se ajusta de suerte tal que el agua moje los tres puntos que hay en la cara interior. Al utilizarse (*ilustración inferior*), el agua proporciona un "horizonte artificial", un plano horizontal absoluto. Cuando el tubo de observación se ajusta al centro de la apertura cruciforme, es paralelo a la superficie del agua. Una barra de altura conocida (*H*), igual a la altura sobre el suelo del tubo de observación, se coloca a una distancia determinada (*L*). Calibrando la apertura cruciforme, el desnivel medio del terreno (θ) puede medirse observando el extremo superior de la barra.

Pero lo más extraordinario es lo siguiente: la sección transversal o luz de los canales reconstruidos se aproxima a la forma que los ingenieros actuales defienden como la más eficiente desde el punto de vista hidráulico, entre los tipos de secciones trapezoidales, el semihexágono. Este tipo de sección reduce al mínimo el perímetro en contacto con el agua, para una determinada superficie del canal, y le permite el mayor flujo posible. Estas innovaciones relajan la resistencia del canal y ayudan a mantener una tasa elevada de flujo, incluso ante un suministro permanentemente menguante. La superficie de sección transversal así limitada aumentaba también la profundidad del agua, evitando la colmatación de los ramales de distribución.

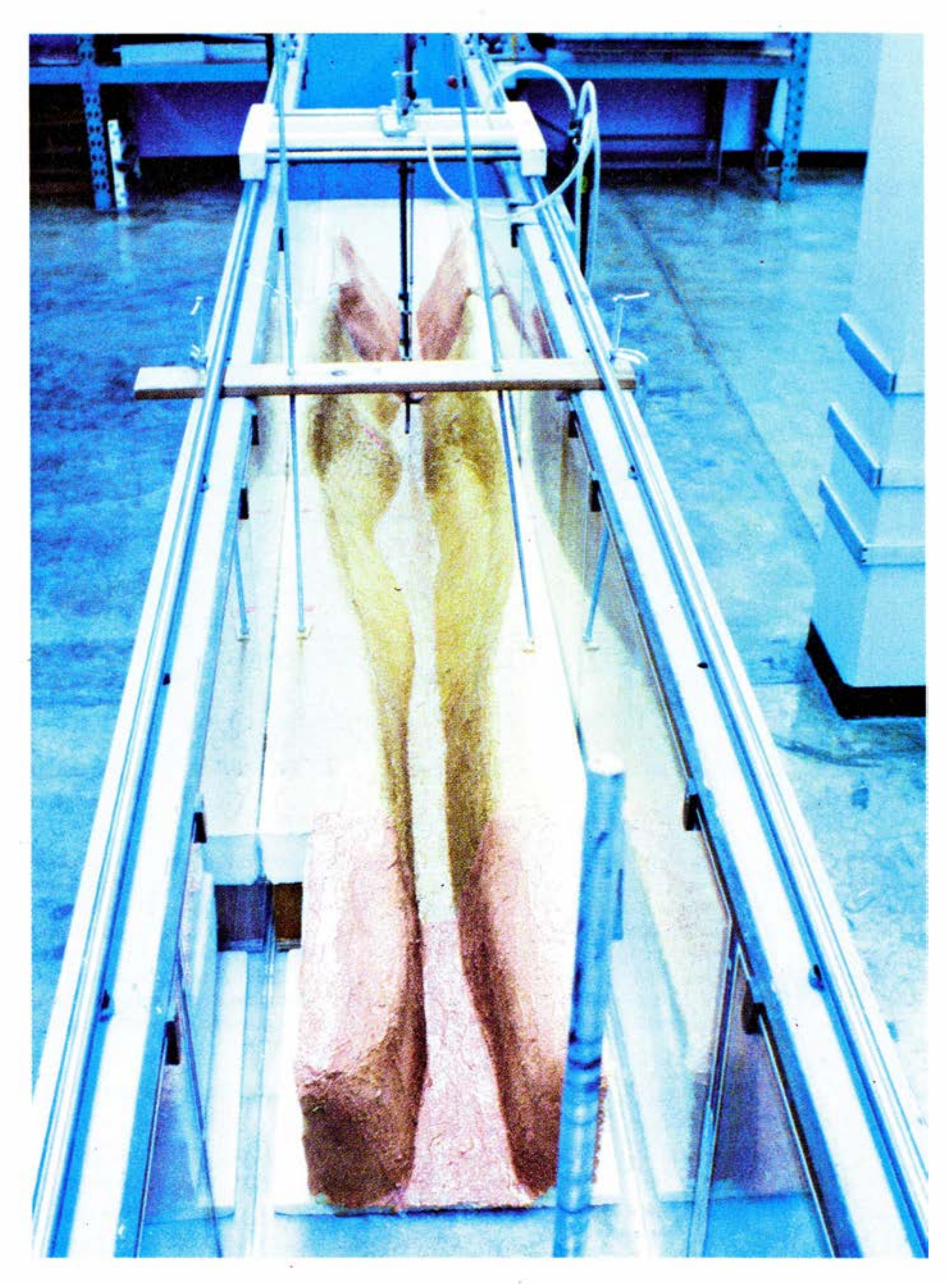
Para regar la mayor extensión posible de campo, el canal que sale del río debe arrancar de una boca del curso superior y discurrir junto al desnivel constante del valle que abarca, a su vez, la mayor superficie posible de terraza. Es ese un aspecto significativo del modelo de canal que sigue las curvas de nivel. Cuanto más suave sea la pendiente del canal, tanto mayor será la cantidad de terreno en desnivel que regará. De ello se deduce que el sistema del canal deberá tener una pendiente muy suave. En efecto, las pendientes del lecho de la Pampa Huanchaco son del orden de 0,009 en la mayor parte del sistema: una pendiente de nueve metros cada mil. Esta pendiente, tan ligera y constante, nos induce a suponer técnicas topográficas muy refinadas que permitían elegir la mejor ruta. Los restos arqueológicos no han proporcionado todavía, sin embargo, rastro alguno de testimonio escrito chimu o anotaciones matemáticas. ¿Cómo se hacían las mediciones topográficas?

Recordaré a este propósito ciertas ideas que me sugirió una cerámica chimu que examiné en el Museo Arqueológico de Huaraz, Perú. Se trata de un cilindro que tiene un agujero en un lado y una figura en forma de cruz en el lado opuesto. Un cuenco de nivelación está sujeto a la parte superior del

cilindro. Basándome en el diseño y en la función implícita de esta cerámica como aparejo topográfico, construí un sencillo instrumento coherente con los mismos principios. El cuenco tiene un agujero en un punto y una figura cruciforme en el punto opuesto. Tanto en el brazo vertical como en el horizontal de la cruz aparecen marcas de graduación; en la cara interior del cuenco, hay tres marcas que definen una superficie plana paralela a un tubo hueco de observación, cuando el tubo atraviesa el agujero y el centro de la cruz.

Cuando se llena de agua el cuenco y se coloca a continuación sobre un recipiente mayor y somero, sujeto sobre un trípode y repleto de arena, la posición del cuenco puede ajustarse hasta que el nivel del agua alcanza las marcas interiores del cuenco. La superficie de agua define entonces un "horizonte artificial", que corre paralelo al tubo de observación. El tubo se puede mover verticalmente para observar a través de él una barra de longitud conocida, colocada verticalmente a determinada distancia. Este procedimiento proporcionaría el ángulo vertical; el ángulo horizontal se establecería mediante cálculos bastante sencillos. He construido un boceto de trabajo de este aparejo topográfico y lo he utilizado para realizar mediciones de campo precisas. No es difícil imaginar versiones mejor y más finamente calibradas que produjeran resultados aún mejores.

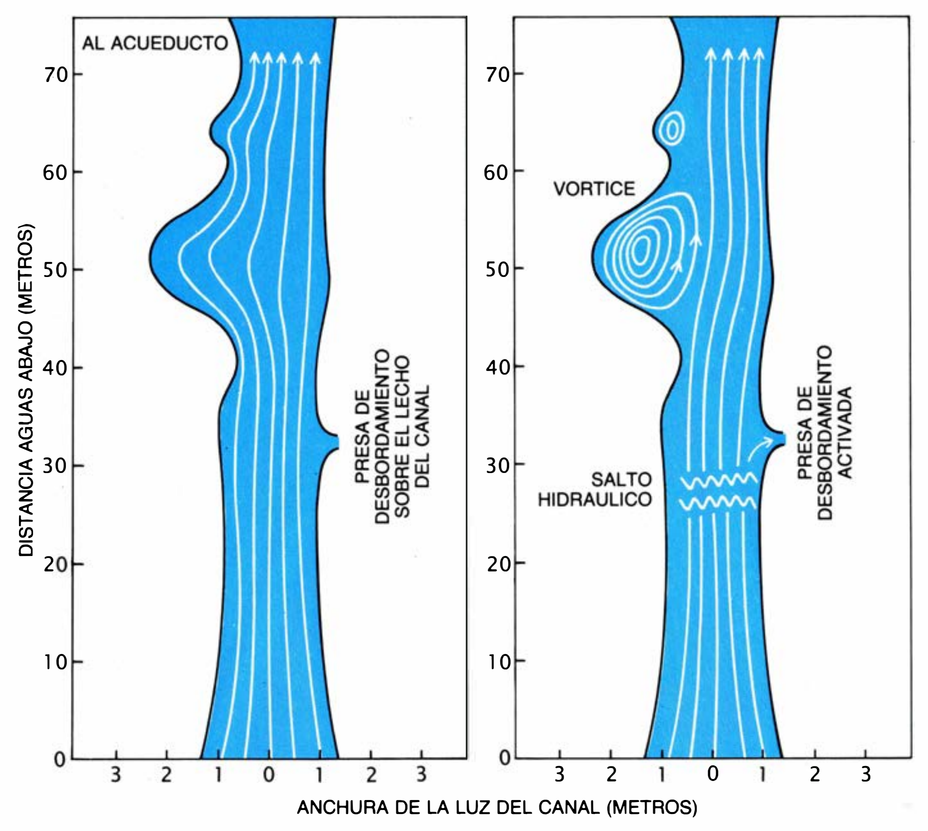
Aunque el canal de la Pampa Huanchaco nos da una idea de la capacidad innovadora de los ingenieros chimu, es el imponente canal de Entrevalles el que nos proporciona la mayor información sobre los trazados óptimos según los chimu. Rasgo peculiar del canal de Entrevalles es la presencia de muchos segmentos que muestran interesantes variaciones en la geometría de su cauce. Variaciones que no eran accidentales; los chimu poseían suficiente habilidad ingenieril como para que esto fuera así. Pero, ¿qué misión desempeñaban?



6. MODELIZACION DE UN SEGMENTO DEL CANAL construida por el laboratorio de materiales compuestos ("composites") de la empresa FMC e instalado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad estatal norteamericana de San José. El segmento se ha tomado del canal de Entrevalles; se encuentra en un tramo anterior a un acueducto. Se le sometió a ensayo en el laboratorio bajo una amplia gama de números de Froude en la toma; pretendíase con ello determinar qué función ejercieron las variaciones en la anchura del canal y la sección en cruz. Se exhiben en la figura número 7 algunos resultados de estas pruebas.

Un dato orientador: bastantes segmentos de ésos se hallan encima mismo, curso arriba, de grandes acueductos (como los que conducen agua salvando una quebrada). Puesto que los acueductos son de grandes dimensiones y requieren un duro trabajo, cabe presumir que esos curiosos segmentos se proyectaron para preservar al acueducto de los efectos de la erosión durante los cambios bruscos de caudal provocados por las inundaciones. Una manera de comprobar esta hipótesis sería mediante simulación por ordenador, pero la simulación de sistemas hidráulicos de canal abierto es, por ahora, un arte impreciso. No ha quedado otro remedio que construir un modelo a escala de una sección de canal situado por encima mismo de un acueducto, para observar su desarrollo bajo diferentes condiciones de flujo.

Los resultados de estos experimentos (llevados a cabo en el laboratorio de hidráulica de la Universidad estatal de San José) fueron reveladores. Se sometió el segmento de canal a una serie de tasas de flujo distintas en la boca de entrada. En hidráulica, esta serie se suele describir mediante una magnitud: el número de Froude. Se llama número de Froude al cociente entre la velocidad del flujo en movimiento y la velocidad de las pequeñas ondas de gravedad que se producen en las aguas someras de los canales, como resultado de cualquier cambio momentáneo en la profundidad local del agua. La velocidad de onda es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad. De ahí que un flujo de escasa profundidad y gran movimiento (como el que resulta



7. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS de modelización del segmento ilustrada en la figura 6. Las líneas de corriente señalan la dirección de las partículas en el canal. En flujos subcríticos en la entrada (*izquierda*), la expansión que sufre el caudal en el canal reduce su velocidad. En flujos supercríticos (*derecha*), se forma en la cavidad un vórtice. El margen de la pauta de las líneas de flujo constituye una "pared virtual", que estrecha eficazmente la luz del canal; este fenómeno crea, además, condiciones de estrangulamiento supercrítico que causan un salto hidráulico. Tras el salto, el canal se ensancha y el caudal se mantiene subcrítico. De esta forma, tanto en el caudal subcrítico en la toma como en el supercrítico, el segmento sirve para reducir el número de Froude de salida y protege contra el inevitable desgaste del acueducto que viene después.

de una fuerte precipitación) tendría un número de Froude por encima de la unidad, mientras que un caudal profundo y de movimiento lento tendría un número de Froude menor que la unidad.

Seguimos el comportamiento del modelo de segmento de canal para una escala de números de Froude en la acometida que iba desde muy por debajo de la unidad hasta muy por encima de ella. Curiosamente, cuanto mayor era el número de Froude en la toma, menor era en la salida. Ahora bien, el número de Froude en la salida puede considerarse medida de la capacidad de un fluido para dañar, por erosión, los revestimientos de la pared del acueducto. Por tanto, los ingenieros chimu frenaban la erosión en los acueductos colocando segmentos aguas arriba que disminuían drásticamente la capacidad erosiva del caudal, aun cuando aumentara su velocidad.

Un minucioso análisis del comportamiento del modelo de segmento puso de manifiesto que semejante logro no pudo llevarse a cabo a la primera. Para entender ese comportamiento, se necesita poseer algún conocimiento de distintas pautas de flujo en un canal abierto, lo que los ingenieros hidráulicos califican como regímenes hidráulicos. Un régimen subcrítico corresponde a un número de Froude inferior a la unidad. La altura del caudal puede aproximarse asintóticamente a la profundidad normal o a la crítica, según sea la profundidad de caudal inicial, para valores pequeños de la pendiente del lecho. A una profundidad normal, el flujo o caudal se mantiene uniforme y corre paralelo al suelo del canal en conducciones de sección eficaz rectangular. Las profundidades normal y crítica son valores teóricos que dependen del perfil del canal, la rugosidad de la pared y la pendiente utilizada para caracterizar los regímenes de caudal.

Un régimen supercrítico, por otro lado, corresponde a un número de Froude mayor que la unidad. Estos flujos rápidos sobre canales en pendiente se acercan asintóticamente a la profundidad normal, siempre que la profundidad inicial de caudal sea menor que la profundidad crítica. Además, los flujos producen discontinuidades en velocidad y profundidad, los "saltos hidráulicos", cuando aparecen contracciones en el canal o cambios repentinos en la pendiente del lecho.

Quizás lo más significativo sea que los regímenes subcríticos y supercríticos se comportan de forma muy diferente cuando el canal se ensancha. Cuando un caudal subcrítico entra en un canal más ancho, se expande y decelera. Un caudal supercrítico, en cambio, acelera su velocidad cuando su canal se ensancha mientras su profundidad disminuye. Estas nociones fundamentales ayudan a entender qué sucede en el modelo de segmento.

Curso arriba, el segmento es estrecho; se ensancha hacia la mitad del recorrido, en una cuenca semicircular. En los casos de números de Froude bajos en la toma, el caudal subcrítico experimenta una disminución de la velocidad por culpa de los efectos de la expansión. Conforme el número de Froude aumenta en la toma, aparece un vórtice en la depresión. Para números de Froude altamente subcríticos (próximos a 1), la línea de flujo del vórtice actúa como una "pared virtual", que produce el mismo efecto que el estrechamiento de la luz del canal. Vórtice abajo, el caudal reduce su velocidad, en virtud otra vez de los efectos de expansión.

En un caudal de toma supercrítica, el vórtice crea, parece, una pauta de línea de flujo deformada, capaz de generar un "estrangulamiento supercrítico". Se provoca así un salto hidráulico, por encima de la zona angosta. Esta discontinuidad en el flujo señala la brusca transición de un régimen supercrítico a otro subcrítico. Por ser subcrítico el caudal tras el salto, la expansión que se presenta curso abajo promueve la deceleración de la velocidad.

Esta sección de conformación insólita del canal de Entrevalles se muestra eficaz para rebajar el número de Froude en la salida (mediante la reducción de la velocidad del caudal y el incremento de su altura) y no daña, por tanto, el revestimiento del acueducto que se halla curso abajo. Además, una represa de derivación puede recoger el agua sobrante cuando la altura que trae el agua tras el salto hidráulico excede la altura de la presa del canal. Puesto que la altura, pasado el salto, se incrementa con el número de Froude en la toma, el embalse ofrece otro servicio protector para drenar el flujo procedente del canal. El empleo de un canal de sección en forma de cruz (junto con los cambios operados en la rugosidad de la pared) para encauzar un flujo que se mueva dentro de cierta gama de nú-

meros de Froude, cuando no puede modificarse fácilmente la pendiende del lecho, debido al fondo rocoso, constituye la mayor innovación hidráulica del canal de Entrevalles. El refinamiento conceptual que se esconde tras esas innovaciones en el proyecto resulta más digno de admiración por cuanto no se conoce anotación matemática alguna.

Pero ni siquiera esa perfección bastó para evitar el hundimiento de los sistemas agrícolas del valle de Moche. La reducción del río Moche acabó por forzar el abandono de los sistemas roturados en el curso alto; los últimos canales (abiertos tras el abandono del canal de Entrevalles) tenían tomas curso abajo; traían agua para regar sólo una pequeña parte de los campos cultivados antaño. Los chimu se vieron abocados, por último, a cultivar la tierra dentro de los muros de Chan Chan, que sólo podía abastecerse con el sistema de canalización más bajo.

Esa merma de tierra de labor pudo haber sido uno de los factores que facilitaron la conquista de la capital chimu por los incas, que debió realizarse hacia 1450 d. C. Lo que más sorprende del reino de Chimor no es, sin embargo, su final, sino lo que hemos expuesto: en un medio en continua degradación para la agricultura hubo una civilización que, con sencillos instrumentos, fue capaz de desarrollar técnicas de ingeniería innovadoras y eficaces, necesarias para mantener el progreso y la continuidad cultural durante cerca de 500 años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OPEN-CHANNEL HYDRAULICS. Ven Te Chow. McGraw-Hill Book Company, 1959.

LIFE, LAND AND WATER IN ANCIENT PERU. Paul Kosok. Long Island University Press, 1965.

HYDRAULIC ENGINEERING ASPECTS OF THE CHIMU CHICAMA-MOCHE INTERVALLEY CANAL. Charles R. Ortloff, Michael E. Moseley y Robert A. Feldman en *American Antiquity*, vol. 47, n.º 3, págs. 572-595; julio de 1982.

THE CHICAMA-MOCHE INTERVALLEY CANAL: SOCIAL EXPLANATIONS AND PHYSICAL PARADIGMS. Charles R. Ortloff, Michael E. Moseley y Robert A. Feldman en *American Antiquity*, vol. 48, n.º 2, págs. 375-389; abril de 1983.

HYDRAULIC ENGINEERING AND HISTORICAL ASPECTS OF THE PRE-COLUMBIAN INTRAVALLEY CANAL SYSTEMS OF THE MOCHE VALLEY, PERU. Charles R. Ortloff, Robert A. Feldman y Michael E. Moseley en *Journal of Field Archaeology*, vol. 12, n.º 1, págs. 77-98; primavera de 1985.

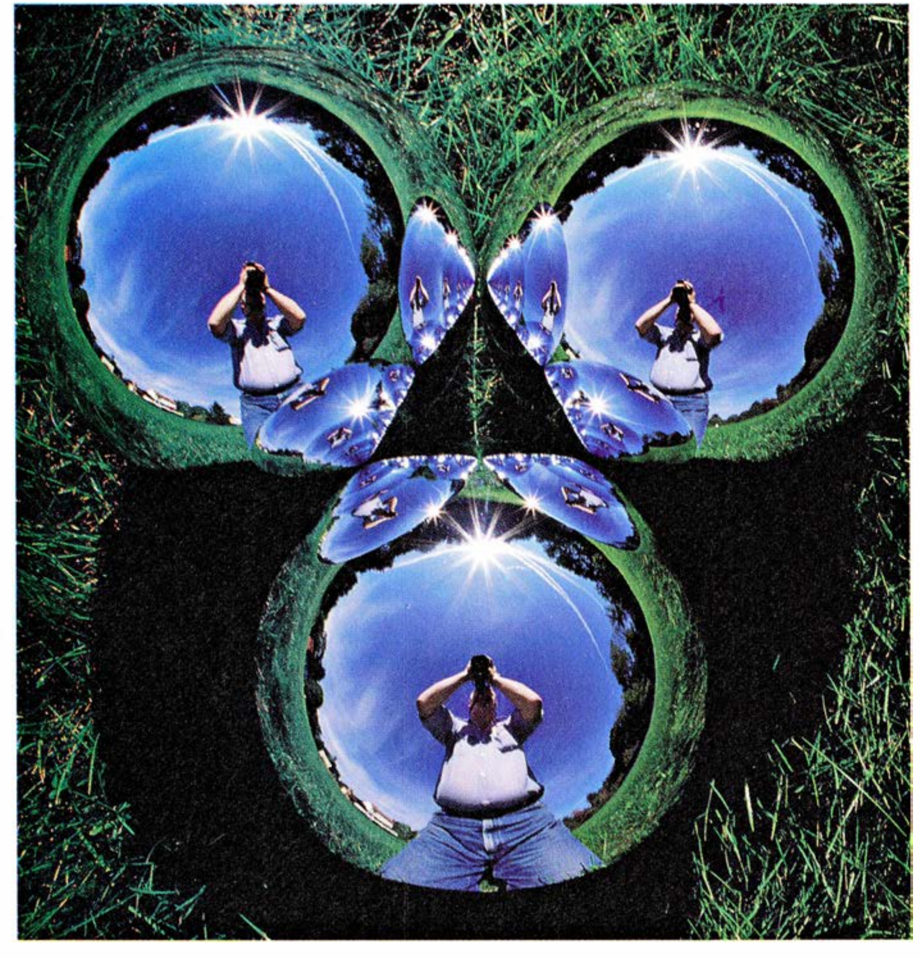
Taller y laboratorio

Sobre las distorsiones o imágenes deformadas que producen los cuerpos reflectantes esféricos

Jearl Walker

Las reflexiones sobre una bola brillante, como las que adornan los árboles de Navidad, dan lugar a una extraña imagen distorsionada del observador y su entorno. Nos convertimos en objeto de un raro homenaje, pues no podemos evitar caer en el centro del despliegue visual, sin que importe desde dónde contemplemos la bola. Las reflexiones mutuas entre dos bolas en contacto producen dos series de imágenes aparentemente infinitas que disminuyen gradualmente de tamaño conforme se acercan al punto de contacto de ambas. Un grupo de tres bolas adyacentes genera un efecto más llamativo, en particular si se encuentran sobre un fondo oscuro. Se produce entonces un derroche deslumbrante de imágenes y el espacio inscrito por las bolas puede aparecer como un triángulo oscuro encerrado entre ellas, que desfigura su carácter esférico. ¿Cómo explicar esas imágenes?

En 1972, Michael V. Berry, de la Universidad de Bristol, publicó un estudio acerca de las reflexiones en cuerpos esféricos: adornos del árbol de Navidad, bolas de acero de rodamientos y globos del jardín. (Casualmente, Berry es el autor del artículo "La fase geométrica" que se publica en este número de *Investigación y Ciencia*.) Cada esfera constituye un reflector convexo y produce unas imágenes distorsionadas y en miniatura que parecen hallarse dentro de la bola. Una bola mayor, de las que adornan los jardines, da mejor resultado porque produce unas imágenes mayores y más nítidas. Dentro de cada esfera se nos presenta un mundo cuya extravagancia supera la del espejo de Lewis Carroll.



1. Reflexiones en tres globos brillantes de los que adornan los jardines

Si en el centro del jardín colocamos una bola grande y la contemplamos, el mundo entero parecerá haberse introducido en la sección transversal de la bola, sección que voy a llamar plano de imagen. En éste, nuestros ojos ocupan el centro y nuestra cabeza queda rodeada por el cielo. El borde del césped (el horizonte, a los efectos) crea un círculo dentro de la imagen y los árboles que bordean el césped se alargan hacia el centro de la misma. Los edificios altos se estiran, asimismo, hacia el centro, aunque aparezcan extrañamente desfigurados, con la base ancha y el techo encogido. Nuestra propia imagen queda deformada, con unos pies excesivamente grandes y un cuerpo que se va estrechando grotescamente hacia la cabeza, como el de un personaje de dibujos animados. La hierba del césped circunda el borde del plano de imagen.

Las imágenes que vemos se deben, como todo el mundo sabe, a la reflexión de los rayos de luz en la bola [*figura 2*]. Un rayo que salga de nuestros ojos regresa a nosotros tras reflejarse en la parte superior de la bola; ese rayo viaja a lo largo de la recta que llamaremos línea central y luego retorna por el mismo camino. Por ese motivo la imagen de nuestros ojos aparece siempre en el centro del plano de imagen. Los rayos procedentes de otros objetos se reflejan y luego viajan hacia nosotros formando cierto ángulo con la línea central. Señalaba Berry que el caso extremo sería el de un rayo que apenas rozase el costado de la bola, de modo que la reflexión apenas afectara su trayectoria. A este rayo, casi tangente a la

bola, lo llamaremos rayo tangente; marca los límites de lo que nos es dado ver. Todo punto del suelo que esté más cerca de la bola que el origen del rayo tangente quedará oculto a nuestra vista. Al resto de objetos que nos rodee le corresponde una imagen en la bola, salvo aquellos cuyos rayos sean interceptados por nuestro cuerpo.

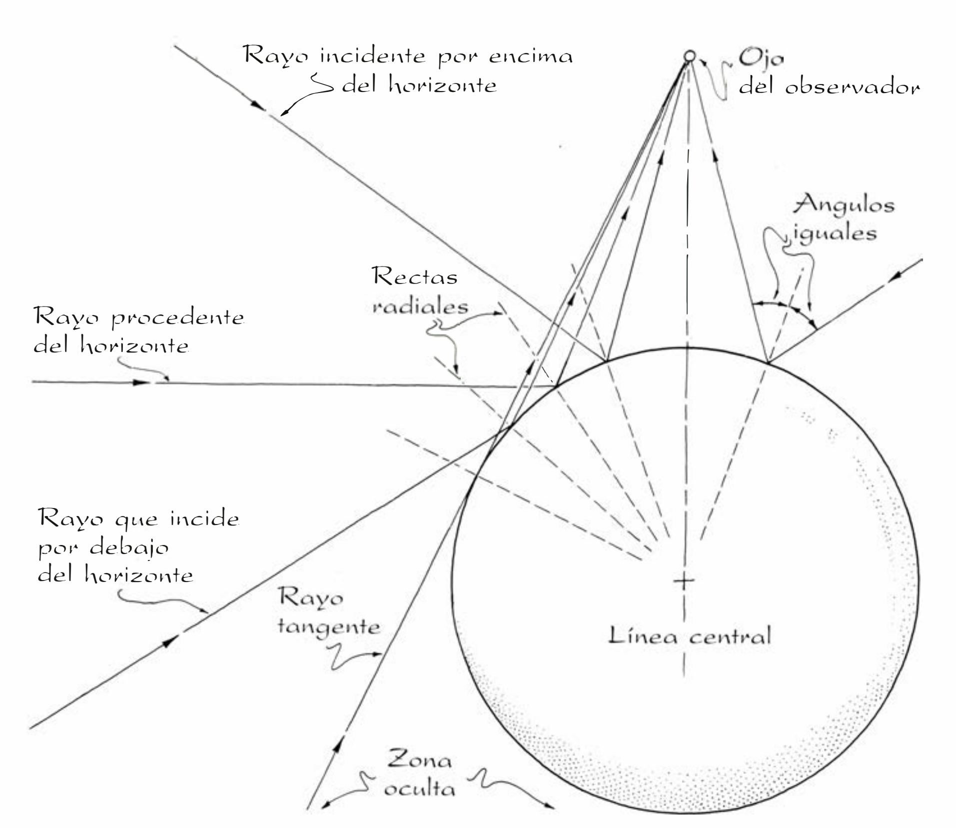
Uno de los rayos que vemos procede de lo que podemos llamar el horizonte efectivo; incide sobre la bola siguiendo una trayectoria horizontal. Los rayos que se reflejen en la bola en un punto más alto que el rayo horizontal se acercan a ella siguiendo una trayectoria que apunta hacia abajo; de ellos diremos que se originan por encima del horizonte. Los rayos que se reflejan hacia nosotros en puntos de la bola más bajos que el rayo horizotal se acercan a ella siguiendo una trayectoria que apunta hacia arriba; de ellos diremos que se originan por debajo del horizonte. (Este último grupo de rayos es importante en la exposición que sigue. Obsérvese que esas imágenes del suelo yacen en la mitad superior de la bola: entre los puntos donde se reflejan los rayos del horizonte y la tangente.)

Cada reflexión obedece a una regla invariable: el rayo incidente y el reflejado deben formar el mismo ángulo con la recta radial que va del centro de la bola al punto de la superficie donde incide el rayo. En el caso del rayo tangente, los ángulos entre los dos rayos y la recta radial son ambos de 90 grados; en el caso del rayo que sale de nuestros ojos, los ángulos son nulos. El modo en que se refleja el rayo del horizonte depende de la distancia entre el observador y la bola. Si esa distancia es grande comparada con el diámetro de la bola, los ángulos para el rayo del horizonte son de 45 grados aproximadamente y el rayo reflejado es casi vertical. Si esa distancia es pequeña, notaremos que el rayo del horizonte se refleja en la bola un poco más arriba. Los ángulos que intervienen en la reflexión serán entonces mayores y el rayo reflejado se inclina hacia nosotros separándose de la vertical.

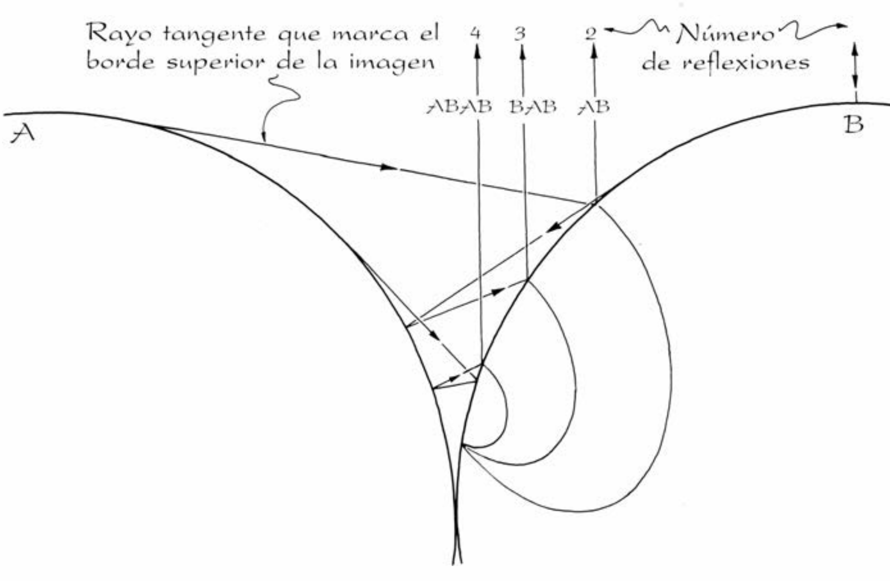
Fue Bob Miller, un artista de San Francisco, quien reparó en el triángulo oscuro que aparece cuando un grupo de tres bolas en contacto descansa sobre un fondo oscuro. En el Exploratorium de aquella ciudad, un magnífico parque de atracciones de la ciencia, puede contemplarse la creación artística que realizó sobre ese motivo. No pude menos que formularme algunas preguntas acerca del triángulo y de las múltiples imágenes de las bolas y del cielo que genera el grupo. ¿De qué modo se reflejan exactamente los rayos para que resulten esas imágenes? ¿Qué bola es la que origina cada imagen?

Pensaba al principio que la tarea de identificar las imágenes era punto menos que imposible. Cada vez que examinaba un grupo de tres globos de jardín e intentaba ver cómo se formaban las imágenes acababa desesperado y perplejo. Así que retiré una bola y estudié las imágenes en las dos restantes. Se veía entonces en cada globo una serie de al menos una docena de imágenes que rodeaban el punto de contacto.

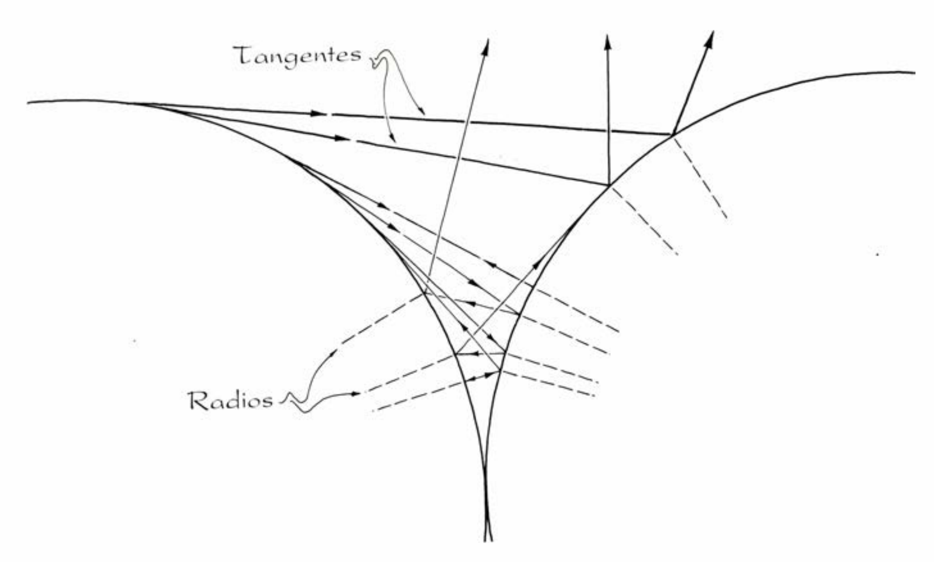
La configuración es similar a las imágenes múltiples que podemos ver situándonos entre dos espejos paralelos, en cada uno de los cuales aparece una serie de imágenes del marco de ese espejo y del marco del otro espejo. La imagen de mayor tamaño la forman los rayos que salen del espejo opuesto y que luego se reflejan en el espejo que estamos mirando. La imagen siguiente



2. *Manera de reflejarse los rayos en un globo brillante*



3. *Reflexiones en dos esferas adyacentes*



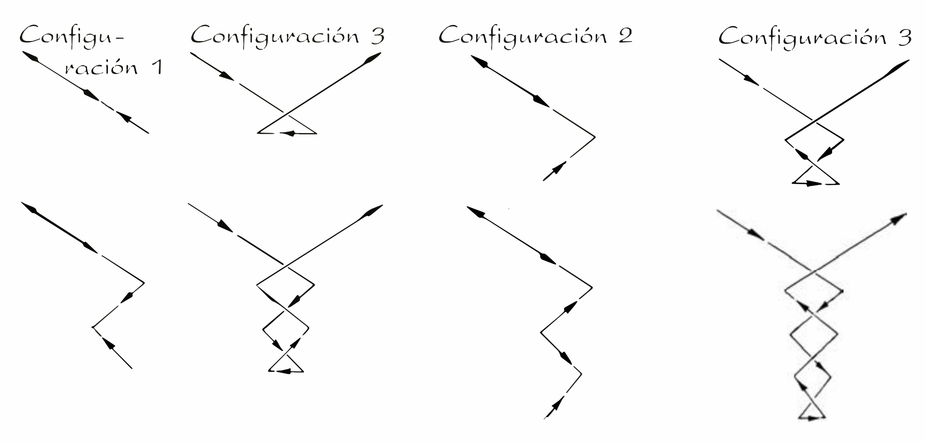
4. Reflexiones de un rayo tangencial conforme se va inclinando hacia abajo

se debe a los rayos que salen del espejo que estamos mirando, tras reflejarse en el espejo opuesto y luego otra vez en el primer espejo. La distancia adicional que recorre este último conjunto de rayos hace que la imagen sea menor. Cada imagen adicional requiere otra reflexión y por eso resulta más pequeña que la precedente.

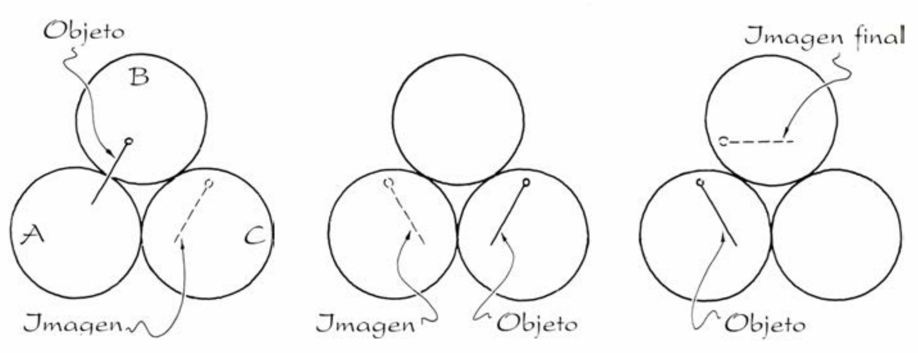
Cuando observamos las reflexiones en dos bolas adyacentes, vemos el borde de una bola y no el marco de un espejo; las imágenes menguan con mayor rapidez que en los espejos planos a causa de la curvatura de las superficies reflectoras. En la figura 3 se ilustran algunas de estas reflexiones. En la parte superior de la bola *B* se obtiene una imagen del cielo producida por rayos que se reflejan una sola vez. Siguiendo hacia abajo, la imagen inmediata procede de la bola *A*. Su borde superior se debe a un rayo tangente procedente de *A* que se refleja en *B* hacia nosotros. Debajo mismo del borde vemos una imagen del cielo que se ha reflejado dos veces, una en *A* y otra en *B*.

Un poco más abajo hay un imagen que procede de *B*. Su borde superior se debe a un rayo tangente que sale de *B*, se refleja en *A* y luego de nuevo en *B*. Inmediatamente debajo se ve la imagen del cielo que se ha reflejado en la secuencia *BAB*. Las demás imágenes que vemos en *B* son similares: se reflejan alternativamente, y por primera vez, en *A* o en *B*; el borde de cada imagen se debe a un rayo tangente.

Al preguntarme si aquellas imágenes podrían catalogarse mejor, abordé los rayos tangentes procedentes de *A*. Empecé por el que saliera de la parte más alta de la bola y se reflejara en *B* hacia la derecha [*figura 4*]. Imaginemos lo que ocurriría si recogiéramos en una cinta de vídeo el rayo inicial procedente de *A*, que se inclina lentamente hacia abajo siguiendo la superficie de *A*, de manera que siempre fuera tangente a la bola. Durante el descenso, el rayo que resulta de la reflexión en *B* bascula hacia la izquierda pasando por la vertical y acercándose hacia *A*; la secuencia de reflexión es *AB*.



5. Configuraciones generales de las trayectorias de la luz



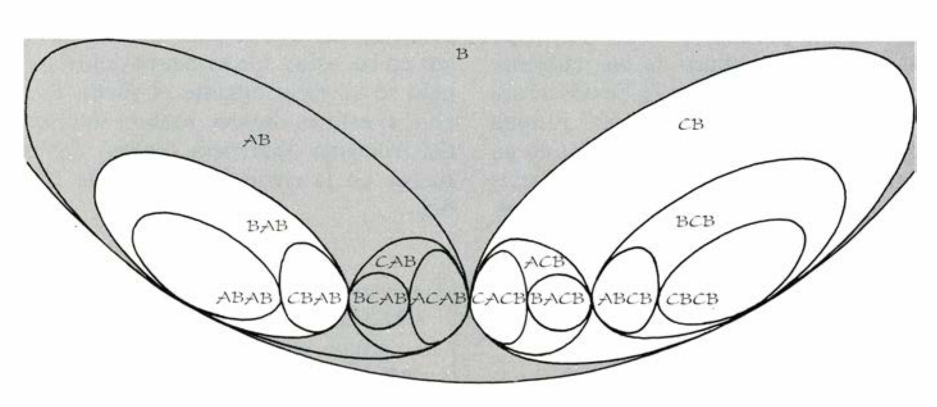
6. Reflexiones múltiples en un grupo de esferas

Paremos la cinta cuando tanto el rayo final como el inicial sean tangentes a *A* y observemos que en ese momento acontece que la luz se refleja a lo largo de una recta radial de *B*. Tal reflexión devuelve la luz a lo largo de su trayectoria inicial, de modo que vuelve a reflejarse tangencialmente desde *A*. Al poner en marcha otra vez la cinta, la luz se refleja tres veces en la secuencia *ABA* y el rayo final comienza a bascular hacia la derecha pasando por la vertical y acercándose luego a *B*. Detengamos de nuevo la cinta cuando el rayo alcance *B* y examinemos la trayectoria de la luz. Obsérvese que el tramo más bajo de la trayectoria es horizontal. Este importante detalle revela que la trayectoria del rayo es simétrica a izquierda y derecha. Como el rayo inicial es tangente a *A*, el rayo final es tangente a *B*.

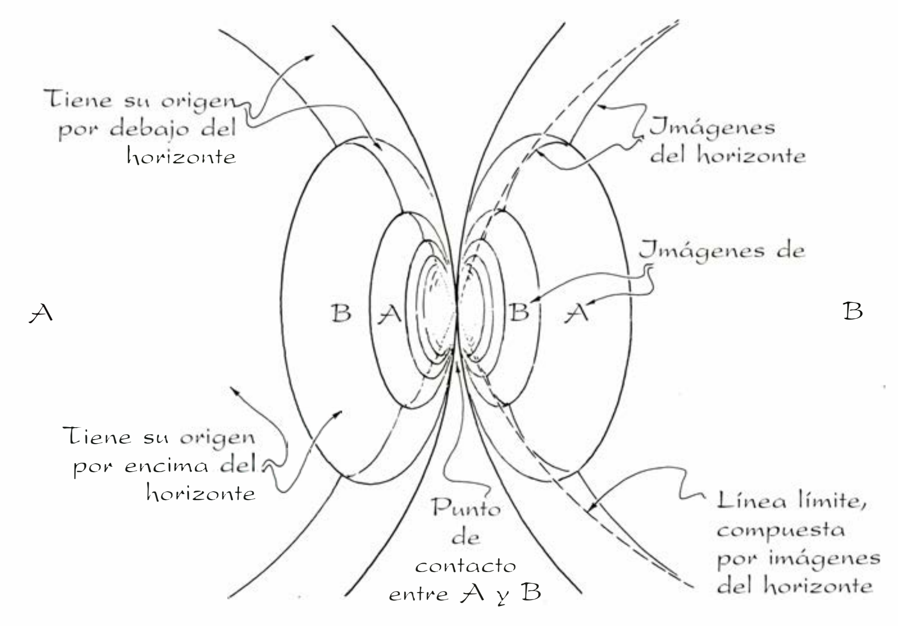
Pongamos de nuevo en marcha la cinta. Tendremos ahora cuatro reflexiones en la secuencia *ABAB*; el rayo final bascula hacia la izquierda, pasando por la vertical hasta llegar a *A*. Detengámosla en ese punto. Precisamente entonces el tramo más bajo del trayecto de la luz se refleja a lo largo de una recta radial de *A* y la luz es devuelta a lo largo de su trayectoria anterior; en el camino de vuelta sigue siendo tangente a *A*.

Con esto basta para predecir el resto de la secuencia contenida en la cinta. Cada vez que el rayo final alcanza la tangente a una de las bolas, se produce una reflexión más. La trayectoria de la luz en ese momento corresponde a una de las tres posibles configuraciones que se caracterizan por el ángulo de inclinación del tramo más bajo del camino. Para definir esas configuraciones, a la bola en que la luz se refleja inicialmene la llamaré "bola original" y a la otra, "bola opuesta". En la configuración 1, el tramo más bajo es radial a la bola opuesta; el rayo final es tangente a la bola original. En la configuración 2, el tramo más bajo es radial a la bola original. En la configuración 3, el tramo más bajo es horizontal, lo que confiere simetría axial a la trayectoria, por lo que el rayo final es tangente a la bola opuesta.

Si volvemos a pasar la cinta y observamos las configuraciones al comienzo de cada reflexión adicional, descubriremos una secuencia 1, 3, 2, 1, 3, 2, y así sucesivamente. Cada vez que el segmento inferior es horizontal, la trayectoria será simétrica. El resto del tiempo el tramo más bajo está alternativamente inclinado hacia otra bola. Las trayectorias que resultan de una larga secuencia de reflexiones pueden entenderse dibujándolos de un modo simplificado que, no obstante, retienen la forma general de cada trayecto.



7. Mapa de las imágenes en la bola B



8. Línea límite formada por dos bolas

Tras este análisis retorné la tercera bola a su sitio. En los puntos donde dos bolas cualesquiera se tocaban advertí una serie de imágenes parecidas a las observadas con sólo dos bolas. La diferencia estribaba en que dentro de cada una de las imágenes producidas en una bola se veían entonces dos imágenes, una mayor que la otra. Dentro de cada una había otras dos imágenes más, una mayor que la otra. Si pasamos por alto los detalles del cielo que aparecen en las imágenes y nos limitamos a su forma, la organización es fractal, o sea, que reproduce la misma figura en una escala siempre decreciente.

Con el fin de identificar la bola de la que procede cada imagen, utilicé un procedimiento de uso corriene en las reflexiones múltiples. Cuando los rayos procedentes de un objeto se reflejan en un espejo plano, una bola brillante o una superficie parecida, se dice que la imagen se forma tras la superficie. Si a continuación los rayos se reflejan en una segunda superficie, la imagen contenida en la primera superficie hace las veces de objeto para la segunda reflexión y aparece una imagen en el interior de la segunda superficie. En una secuencia de reflexiones múltiples, podemos comenzar con el objeto original y seguir como se ha indicado, paso a paso, las sucesivas reflexiones. En cada reflexión la imagen que resulta sirve de objeto para la siguiente, hasta que un observador intercepta los rayos y ve la imagen final.

En la figura 6 se ilustra el procedimiento para una secuencia en que los rayos procedentes del firmamento se reflejan primero en *A* y *B*, luego en el orden *CAB*, hasta aparecer en el costado de *B*. No están representadas las primeras reflexiones, pero las imágenes combinadas del firmamento que se producen en *A* y *B* se indican con una línea que une *A* y *B* y que tiene un punto en el extremo correspondiente a *B*. En la primera parte de esa figura se ilustra la siguiente etapa de la secuencia. En este caso, las imágenes de *A* y *B* hacen de objetos y en *C* aparecen sus imágenes. En la segunda parte de la figura se ilustra la etapa siguiente: las imágenes formadas en *C* hacen de objetos y en *A* aparecen nuevas imágenes. En la tercera parte de la figura, esas imágenes hacen de objetos y en *B* aparecen las imágenes finales, que son las que vemos en el costado de la bola. Adviértase que, con este procedimiento, podemos determinar adónde va a parar la imagen del firmamento que *B* refleja por primera vez. Se encuentra a la izquierda de la imagen del firmamento que *A* refleja por primera vez.

En la figura, las secuencias de las reflexiones son *ACAB* y *BCAB*. Tras repetir el análisis correspondiente a otras secuencias posibles, levanté un mapa con un buen número de las imágenes que se ven en *B* [*figura 7*]. Se observará que en el mapa (y en la bola) forman curvas de nivel y que las situadas en un nivel más bajo (más abajo en la bola) son menores que las situadas en un nivel más alto (más arriba en la bola).

Vamos a examinar de arriba abajo los óvalos sombreados del mapa hasta llegar a las imágenes que acabamos de describir.

Hemos llamado *B* al nivel más alto; corresponde a la cúspide de la bola, donde los rayos de luz procedentes del firmamento se reflejan directamente hacia nosotros. En el lado izquierdo del nivel siguiente hay una imagen del firmamento reflejada inicialmente por *A*. Esta imagen rodea el punto de contacto entre *A* y *B* y forma parte de la serie que se observa cuando únicamente están presentes *A* y *B*. Dentro de ella hay dos imágenes más. De éstas, la de la derecha es una imagen cuyos rayos sufren la secuencia de reflexiones *CAB*; en su interior hay dos imágenes más correspondientes a las secuencias *BCAB* (a la izquierda) y *ACAB* (a la derecha) y que son las representadas en la figura anterior.

Puede el lector entretenerse en añadir más estratos al mapa. Observará que las imágenes se irán haciendo más pequeñas y los estratos se irán poblando más densamente. Bajo nuestra perspectiva de *B*, las imágenes cada vez menores tienden hacia una "línea límite" definida por el punto donde se tocan *A* y *B* y el punto donde se tocan *B* y *C*. En la parte visible de la bola que cae por debajo de la línea límite aparecen imágenes del suelo.

¿Y qué es la línea límite? Se trata de una combinación de imágenes del horizonte, o sea, del borde lejano del suelo o de aquello que constituye el fondo para las bolas [*figura 8*]. Cuando las observamos de cerca, vemos que el horizonte aparece curvo en todas las imágenes; si nos alejamos lo suficiente, la curvatura es imperceptible y los tramos de horizonte parecen yacer en una misma recta. La línea límite que parte del punto de contacto entre *A* y *B* se une sin solución de continuidad con la línea límite que parte del punto de contacto entre *B* y *C*; la combinación de ambas constituye uno de los lados del triángulo de la composición de Miller. Los otros dos lados están formados asimismo por las líneas límites constituidas por las otras combinaciones de bolas. Por debajo de cada línea límite (en el interior del triángulo) sólo se ven imágenes del suelo reflejadas al menos una vez en las bolas. En el centro del triángulo se ve directamente el suelo. Por ello, si éste es oscuro, todo el interior del triángulo aparecerá oscuro, como sucede en la creación artística de Miller.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REFLECTIONS ON A CHRISTMAS-TREE BAUBLE. M. V. Berry in *Physics Education*, vol. 7, n.º 1, págs. 1-6; 1972.

Juegos de ordenador

Paseos aleatorios conducentes hacia muchedumbres fractales

A. K. Dewdney

"Las fractales más útiles comportan azar... tanto sus regularidades como sus irregularidades son de naturaleza estadística."

-Benoit B. Mandelbrot: *The Fractal Geometry of Nature*

¿Se trata de un ion de cinc, de una mota de hollín, o de un borracho tambaleante, que va dando tumbos por la pantalla del monitor? ¿Se unirá a otros de su clase para formar una florescencia metálica, un manchón oscuro o una muchedumbre insensible? La respuesta depende sólo de la imaginación de cada cual, aunque —flor, mancha o multitud— la forma del agregado es incuestionablemente fractal; más todavía, su dimensión fractal (comprendida entre 1 y 2) puede incluso ser medida.

Podemos crear fractales (como la que vemos en la figura 1) merced a un programa llamado CRECELENTO. El programa instruye a una sucesión de partículas para que vagabundeen sin objeto por la pantalla hasta que acaben por encontrarse con una colección de parientes. Tan pronto acontece el encuentro, la partícula queda "congelada", y se detiene. Al irse acumulando una a una varios centenares de partículas, la colección va lentamente desarrollando las ramificaciones irregulares y los zarcillos que caracterizan a las configuraciones fractales.

El programa CRECELENTO estuvo indirectamente inspirado por un artículo aparecido en esta revista hace un par de años [véase "Crecimiento fractal", por Leonard M. Sander; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1987]. El artículo describía el proceso que acabo de esbozar, al que se conoce como agregación con difusión limitada, que abreviaremos ADL.

Varias almas intrépidas, animadas del espíritu aventurero que caracteriza a los lectores de esta sección, no esperaron a que yo tomase de mi mano los programas de simulación de ADL, sino que redactaron por iniciativa propia diversas versiones de CRECELENTO. En particular, quien me forzó la mano fue Eric M. Smiertka, de Santa Clara, California. Con apenas poco más que un curso elemental de programación entre pecho y espalda, preparó con éxito una versión de CRECELENTO. No contento con limitarse a observar el crecimiento de su fractal, midió también su dimensión.

El proceso ADL podría perfectamente representar la difusión de iones de cinc a través de una disolución electrolítica bidimensional. Cuando los iones entran en contacto con una agregación de cinc metálico en uno de los electrodos, se ligan inmediatamente a los compañeros atómicos que componen el agregado. Las partículas de hollín que son arrastradas por el aire de acá para allá, antes de tropezar con otras partículas adheridas a cierto sustrato, parecen ajustarse al mismo proceso, si bien en este caso la fuerza que mantiene las partículas en cohesión es, según parece, de naturaleza electrostática.

El más pintoresco (aunque también el menos realista) de los modelos de proceso ADL supone que una sucesión de beodos van dando tumbos en la oscuridad hasta topar con una multitud de otros insensatos camaradas; arrullados por el rumor de los pacíficos ronquidos, se tumban y duermen al instante. Una vista aérea de la muchedumbre durmiente podría perfectamente revelar el mismo perfil fractal que vemos en un cúmulo de cinc o en un pegote de hollín.

La clave para construir la parte de difusión del proceso de agregación con difusión limitada es un "paseo aleatorio". Cada uno de los pasos de una caminata aleatoria en dos dimensiones se da en una de cuatro direcciones: norte, sur, este y oeste; en cuál de las cuatro, lo va decidiendo el azar. (En ocasiones, los paseos aleatorios admiten también direcciones intermedias, como el sureste, pero aquí me atendré a la versión más restrictiva.) La figura 2 ofrece la trayectoria típica descrita por una partícula durante un paseo aleatorio. La partícula parece seguir un curso tortuoso y sin objeto. Al observar sobre la pantalla el desplazamiento de tal partícula, uno podría estar disculpado si tuviera serias dudas de que llegase jamás a un destino determinado. Pero la partícula sí tiene una meta (por ser un poco teleológico): alcanzar la multitud de partículas congéneres que se acumulan en el centro de la pantalla.

Todo comienza cuando CRECELENTO sitúa una partícula individual en el centro de la pantalla del ordenador. Seguidamente, se libera una partícula, que emprende un paseo aleatorio desde un punto seleccionado al azar en un gran círculo centrado en la partícula inicial. Tras larga y ardua jornada, la partícula móvil se tropieza con la estacionaria y se detiene. En cuanto así ocurre, CRECELENTO despacha desde un punto igualmente elegido al azar una nueva partícula, que realizará un viaje similar. Las partículas van reuniéndose una tras otra en torno al punto que ocupaba la primera, y dentro del círculo hace aparición un extraño perfil, una excrecencia arbórea con ramas y varas curiosamente retorcidas. Tal figura es consecuencia de la tendencia de la partícula que camina al azar a tropezarse con la parte exterior de la muchedumbre bastante antes que con la cohorte situada mucho más adentro en la multitud; por así decirlo, más probable es que les crezcan ramas a los vástagos que al tronco.

Pero todo necesita su tiempo. Como dice Smiertka, "hacen falta cuatro o cinco horas de funcionamiento en mi IBM XT; así que lo dejo funcionar por la noche". Los algoritmos que describiré seguidamente dan una versión algo más rápida del programa, aunque, como es obvio, la duración de una pasada dependerá del número de partículas que se desee acumular.

El algoritmo de difusión (LENTO) es un poco más fácil de preparar que el algoritmo de agregación (CRECE). Por simplicidad, limitaré la acción al interior de un círculo de 200 píxeles de diámetro. Para elegir el punto desde el cual emprende su caminata aleatoria una partícula dada, LENTO determina

en una instrucción un ángulo al azar, y en las dos instrucciones siguientes calcula las coordenadas del punto de la circunferencia de tal ángulo:

ángulo ⟵ *azar* × 360
x ⟵ 100 × coseno (*ángulo*) + 100
y ⟵ 100 × seno (*ángulo*) + 100

El propio ordenador ha de elegir aleatoriamente un número, al que hemos llamado *azar*. Dado que las instrucciones de obtención de *azar* proporcionan un número comprendido entre 0 y 1, es preciso multiplicarlo por 360 para disponer de un ángulo comprendido entre 0 y 360 grados. (En los sistemas que en lugar de grados utilicen radianes, es preciso multiplicar *azar* por 2π, o sea, por 6,283, aproximadamente.) El paso siguiente calcula la abscisa *x* de un punto de la circunferencia situado en dicho ángulo, multiplicando por 100 (el radio del círculo) el coseno del ángulo. El tercer paso calcula la ordenada y el punto con ayuda de la función seno. Dado que los sistemas de programación más populares sitúan el origen (el punto de coordenadas (0,0)) en un ángulo de la pantalla, he sumado incrementos de 100 a las dos coordenadas, para dejar centrado el círculo en la pantalla. Como es obvio, ello sólo sucederá en aquellas pantallas que tengan 200 por 200 píxeles. Los lectores deben averiguar cuáles son los incrementos más idóneos para las pantallas de que dispongan.

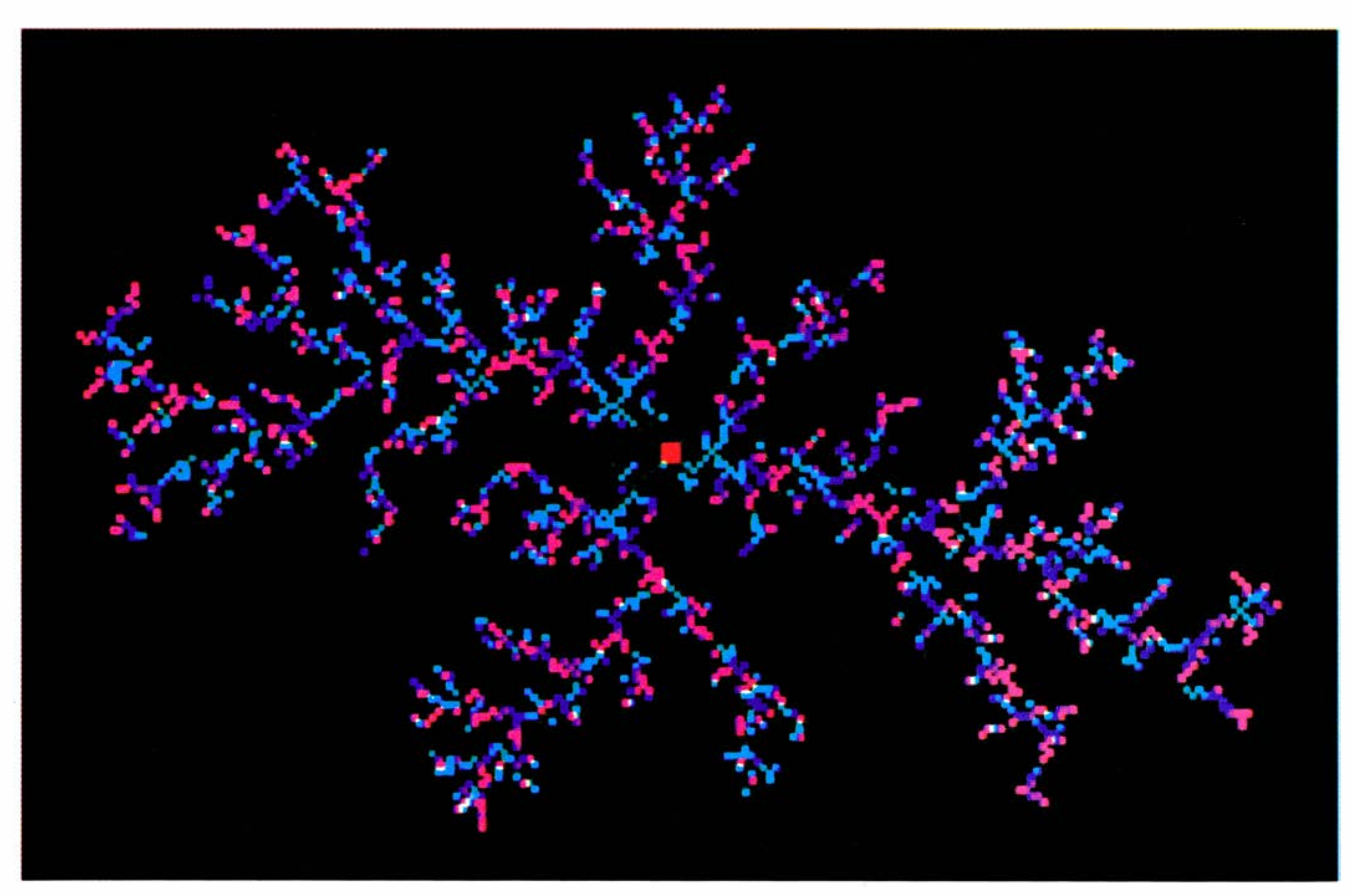
Una vez determinado el punto de partida de la partícula, LENTO tiene ahora que ponerla en movimiento, lo que hace con el siguiente algoritmo (que está incluido en un bucle):

opción ⟵ *azar*
si *opción* ≤ 0,25
  entonces *x* ⟵ *x* +1
si *opción* > 0,25 y ≤ 0,5
  entonces *x* ⟵ *x* −1
si *opción* > 0,5 y ≤ 0,75
  entonces *y* ⟵ *y* + 1
si *opción* > 0,75
  entonces *y* ⟵ *y* − 1

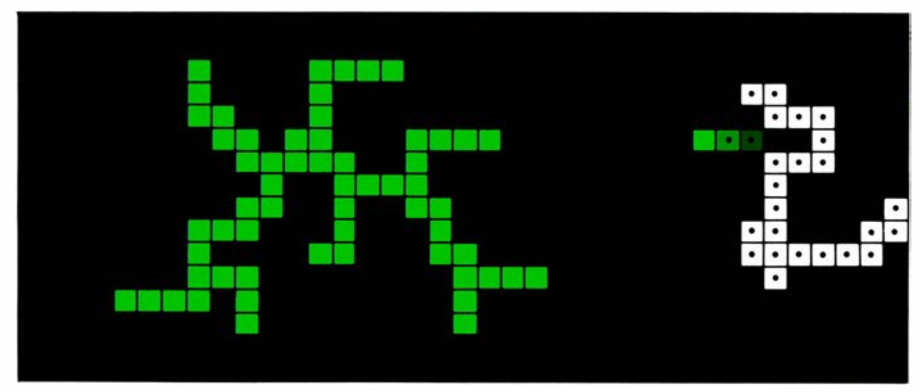
Las reglas de desplazamiento están explícitamente formuladas en función de una variable aleatoria, llamada *opción*. Dependiendo de dónde caiga *opción* (dentro de uno de los cuatro intervalos equiprobables de su gama de valores), una de las coordenadas de la partícula será aumentada o disminuida en una unidad. De ese modo, la partícula se mueve al azar un píxel hacia arriba, hacia abajo, hacia la derecha o hacia la izquierda.

En cambio, lo que no se ha enunciado explícitamente son las condiciones en las que ha de detenerse el movimiento de una partícula, a saber: cuando la partícula, en su aleatoria caminata, se haya salido del círculo en el cual se originó o cuando haya llegado a un píxel adyacente a la masa en acreción de píxeles que constituyen la muchedumbre fractal. En el primer caso, CRECELENTO se limita a extinguir la partícula; de no hacerlo, sería muy posible que la partícula se alejara en su vagabundeo y se internase en una noche electrónica sin fin. En el segundo, CRECELENTO fija la partícula al punto donde encuentra al cúmulo en crecimiento, dejándolo como paralizado por la visión de una Medusa fractal.

Tales instrucciones están incorporadas en un enunciado condicional del tipo *mientras* al comienzo del bucle del paseo aleatorio que da animación a las partículas. Las excursiones que se salen del círculo quedan desechadas sin más que llevar control de la distancia de la partícula al centro de la circunferencia. La distancia es computada cada vez que se dispone de nuevos valores de *x* e *y*. (En realidad, CRECELENTO calcula el cuadrado de la distancia. Se ahorra así un poco de tiempo, porque se elimina el cálculo de una raíz cuadrada.)



1. La muchedumbre fractal de Kevin Eber



2. Un borracho tambaleante puede sumarse –o no– a la multitud

$distx \longleftarrow x - 100$
$disty \longleftarrow y - 100$
$distancia \longleftarrow distx^2 + disty^2$

La condición *mientras* va comprobando cuánto ha viajado la partícula desde el centro del círculo, para lo cual compara *distancia* con el cuadrado de 100 (más 1). Si se infringe la condición, el programa saldrá del bucle y volverá a empezar con otra partícula.

¿Cómo se determina la otra condición, a saber, si la partícula ha ido a engrosar la multitud? Para responder a esta pregunta, CRECELENTO mantiene dos listas, una para las abscisas y otra para las ordenadas de cada partícula de la muchedumbre. Tales listas son matrices unidimensionales llamadas *multx* y *multy*. La partícula "semilla" inicialmente situada en el centro de la pantalla tiene, pues, coordenadas *multx*(1) = 100 y *multy*(1) = 100. Cuando en su peripatética carrera una partícula entra en contacto con la muchedumbre, CRECELENTO ejecuta las instrucciones:

```
dibujar el punto (100,100)
contador ← 1
multx(1) ← 100
multy(1) ← 100
mientras contador ≤ 500

  [elección de punto en el círculo]

  distancia ← 0
  contacto ← falso
  mientras distancia < 10001 y no contacto
      borrar el punto (x,y)

      [algoritmo de movimiento]

      dibujar el punto (x,y)

      [computar distancia]

      [algoritmo de contacto]

  si contacto = verdadero
     entonces contador ← contador + 1
         multx(contador) ← x
         multy(contador) ← y
```

3. Listado del algoritmo CRECELENTO *completo*

$multx$(contador) $\longleftarrow x$
$mutly$(contador) $\longleftarrow y$

Como su nombre indica, *contador* lleva la cuenta del número de partículas de que consta el agregado. Al principio de CRECELENTO, *contador* tiene el valor 1; cada vez que se suma una nueva partícula al agregado, el *contador* ha de ser incrementado en una unidad.

Mas, ¿cómo puede saber CRECE que una partícula ha acabado por engrosar la agrupación de sus congéneres? El algoritmo de contacto más sencillo consiste en comparar las coordenadas de los cuatro píxeles que rodean a la partícula en su posición actual con las coordenadas de los píxeles que están registrados en las listas *multx* y *multy*.

para $n \longleftarrow 1$ hasta *contador*
$x1 \longleftarrow x + 1$
  si $x1 = multx(n)$ e $y = multy(n)$
entonces *contacto* $\longleftarrow$ verdadero
$x1 \longleftarrow x - 1$
  si $x1 = multx(n)$ e $y = multy(n)$
entonces *contacto* $\longleftarrow$ verdadero
$y1 \longleftarrow y + 1$
  si $x = multx(n)$ e $y1 = multy(n)$
entonces *contacto* $\longleftarrow$ verdadero
$y1 \longleftarrow y - 1$
  si $x = multx(n)$ e $y1 = multy(n)$
entonces *contacto* $\longleftarrow$ verdadero

He utilizado también una variable de las llamadas "booleanas", a la que he llamado *contacto*. Tal variable toma los valores verdadero o falso (o lo que es equivalente, 1 y 0). Justo antes de iniciarse el bucle *mientras*, se le da a *contacto* el valor inicial de falso.

Tenemos descritas ya todas las características esenciales de CRECELENTO, si se exceptúa un bucle externo del tipo *mientras*, que mantiene a CRECELENTO en funcionamiento hasta que *contador* alcanza un número predeterminado de partículas, por ejemplo, 500. El algoritmo completo de CRECELENTO puede verse en la figura 3. Las porciones ya descritas están representadas mediante bloques debidamente rotulados. Las partes que no han sido explícitamente descritas contienen instrucciones de inicialización de las variables y que borran y dibujan partículas. (Es preciso advertir a los programadores novatos para que no se tomen literalmente lo de borrar y dibujar; en los sistemas de programación reales estas órdenes no son viables. En lugar de eso, ambas operaciones se efectúan mediante otras órdenes que colorean píxeles.)

Las multitudes fractales, como las producidas por CRECELENTO, pueden ser clasificadas en categorías mediante una dimensión que caracteriza su tasa de crecimiento. Consideremos, en particular, el número de partículas que yacen en el interior de un círculo de radio R. Si un acúmulo fractal llegase —poco más o menos— a llenar el área general donde tiene lugar su crecimiento, sería de esperar que la duplicación del radio produjese una cuadruplicación del número de partículas contenidas en el interior del círculo: el crecimiento de la multitud sería cuadrático. Dicho de otro modo, sería de esperar que el número de partículas fuese sensiblemente proporcional a R^2. Por otra parte, si una multitud de partículas adoptase forma lineal, con pequeña o nula ramificación, la duplicación de R no haría más que duplicar el número de partículas comprendidas en el círculo. El crecimiento de la multitud sería lineal, es decir, proporcional a R. Resulta que el crecimiento fractal tiende a ser más rápido que el lineal, pero más lento que el cuadrático: el número de partículas fractales de un círculo de radio R es proporcional a R^d, siendo d un número comprendido entre 1 y 2.

Por tal motivo, la representación gráfica que muestre el número N de partículas de una multitud de CRECELENTO en un eje y el radio R (medido en píxeles) en otro produce una línea que se encuentra a medio camino entre una línea recta (el resultado del crecimiento lineal) y una parábola (resultado del crecimiento cuadrático). Resulta delicado determinar el exponente fraccionario que determina el crecimiento de la multitud de partículas a partir del mero examen de esa curva. La tarea se simplifica un poco efectuando la representación gráfica sobre papel logarítmico.

El papel logarítmico tiene señaladas coordenadas horizontales y verticales que se duplican, triplican o aumentan en un determinado factor dependiente de la unidad elegida. Al representar N en función de R en papel logarítmico, a las curvas cuadráticas les ocurre algo curioso: ¡se convierten en líneas rectas!

¿Por qué? Recordemos que en el crecimiento cuadrático, cada vez que se duplica el radio, el número de partículas se cuadruplica. En papel logarítmico tal hecho supone en ordenadas un aumento regular de cuatro unidades por cada dos unidades que se avanza en abscisas, situación que corresponde a una línea recta de pendiente 2. De hecho, las tasas de crecimiento proporcionales a R^3 aparecen por igual razón convertidas en líneas rectas de pendiente 3 al representarlas en papel logarítmico.

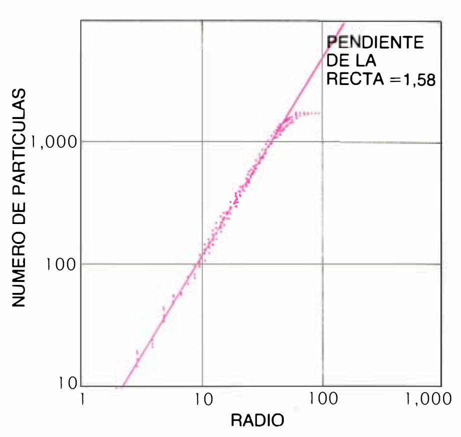
Esta última observación nos dice qué hemos de hacer una vez representados en papel logarítmico los puntos correspondientes a todas las parejas de valores de R y N. Si la figura es fractal, todos estos puntos se hallarán sensiblemente en torno a una línea recta (salvo cerca del origen de la línea, donde la multitud propende a disminuir paulatinamente). La pendiente de esta recta es aproximación de la dimensional fraccional de la multitud.

Eso fue exactamente lo que hizo Smiertka para una de sus creaciones con el programa CRECELENTO; vemos su gráfica en la página adyacente. La pendiente de la línea de crecimiento es 1,58. La estimación es ligeramente menor que las publicadas en la literatura científica, pero ello mal podría reducir su placer en llevar a cabo la medida. Smiertka ha proseguido su experimentación con diferentes reglas que gobiernan la ligadura de partículas y al medir la dimensión fractal de las fractales ADL.

Como ya mencioné, también otros lectores redactaron versiones de CRECELENTO. Scott Camazine, de Ithaca, N.Y., concede que sus partículas no siempre se mueven al azar y que a veces parecen "invadir" la agregación. Pero sus imágenes gráficas de fractales me han convencido de que seguramente sí ha plasmado correctamente los detalles básicos de la ADL. Camazine enviará su programa a los lectores que le escriban a 36 Dove Drive, Ithaca, N. Y. 14850.

Kevin Eber, que estudia el segundo ciclo de ciencias de la información en la Universidad de Colorado, preparó una versión de CRECELENTO en la que todas las partículas surgen de puntos elegidos al azar en el borde izquierdo de la pantalla. Con ayuda de su amigo Jon Saken, que está en el Centro de Astrofísica y Astronomía Espacial de su universidad, logró producir la multitud fractal que vemos en la figura 1. Eber cambió el color de sus partículas cada 100 iteraciones, con el fin de disponer de un método rápido para estimar el número de partículas que se han reunido en la pantalla del monitor.

Finalmente, debería mencionar a Marlin Eller, que escribió desde Hiroshima, en Japón, para exponer un programa llamado HOLLÍN. Se parece a CRECELENTO en casi todo, salvo en que la difusión se produce en dirección contraria: las partículas son emitidas desde el centro de la pantalla y vagabundean hasta que se tropiezan con un círculo que las rodea o con alguna otra partícula de hollín. Se forman de este modo zarcillos que crecen hacia adentro, hasta que, por fin, el emisor queda atascado.



4. Método para estimar una dimensión fractal

Algunos lectores detectaron varios errores sutiles en el artículo sobre números primos.

Los números 51, 57 y 111 no son primos, como señalaron cientos de lectores. Además, el veterano cometió un error al demostrar la infinitud de los primos. Tras suponer que n fuese el último primo, multiplicó todos los primos de 2 a n y añadió 1 al producto. Llamó p al producto. (Cuando el novato dijo: "¡No me diga que p es primo!", el veterano debería haber señalado que p no es divisible por ninguno de los primos de la colección supuesta cuenta finita. Esto significa que p es primo o que hay otro primo (fuera de la colección) que divide a p. Hay, pues, un número nuevo que es primo. Se detectaron errores más sutiles. No faltó quien notase que el programa CRIBA*2* podía sacar a la luz muchos más primos de los que yo había indicado. Propuse un millón como límite de las iteraciones, pero el límite es, en realidad, de alrededor de un millón al cuadrado, dado que en la tabla p tan sólo es preciso guardar los números primos menores o iguales que la raíz cuadrada del número de iteraciones previstas. Samuel D. Yates, de Delray Beach, Florida, recibió numerosas peticiones de una lista que en el artículo de septiembre describí diciendo que daba todos los primos mayores que 1000. Lo que realmente ofrece Yates es una lista de todos los números primos conocidos que tienen más de 1000 dígitos.

En la sección de octubre describí la máquina batiburrillo, un autómata celular construido por dos alemanes, Martin Gerhardt y Heike Schuster, de la Universidad de Bielefeld. La máquina batiburrillo imita de un modo precioso las oleadas de color que se expanden a través de ciertas mezclas químicas excitables. Estas olas desarrollan, a veces, bordes que se curvan en espiral, produciendo auténticos tumultos de formas de Paisley. Pero ello no supone necesariamente, como presumen varios lectores, que tras las arrolladas olas de excitación se agazape el caos; no debemos confundir el caos con la zapatiesta y el batiburrillo.

Me ofrecí a repartir un esbozo algorítmico del programa llamado BATIBURRILLO. Tal esbozo, que muchos lectores me solicitaron, me permitió no sólo ampliar las instrucciones necesarias para crear sobre la pantalla reacciones químicas, sino aclarar también algunos de los puntos del artículo. Ante todo, el parámetro g ha de tomar valores comprendidos entre 1 y 20. Asimismo, la variable A, que es el número de células infectadas que aparecen en el entorno de una célula infectada concreta, hace figurar en el total a dicha célula particular.

No dispongo de suficiente espacio para mencionar todos los enfoques de carácter recreativo con que los lectores afrontaron el reto de la máquina batiburrillo. No obstante, es preciso que mencione a Donovan Smith, de El Cerrito, California, que comprimió a una dimensión la regla de batiburrillo. Smith dispone los estados iniciales en una hilera de células situadas sobre lo alto de su pantalla de presentación. Cuando le suelta las riendas a su autómata lineal, las tiras sucesivas van mostrando intrigantes configuraciones de pasados saludables que dan lugar a futuros infectados. Tras dejar funcionar su programa toda una noche, Smith descubrió una configuración que se repetía una y otra vez, a modo de sucesión interminable de olas unidimensionales en rebote.

FURTHER READING

THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE. Benoit B. Mandelbrot. W. H. Freeman and Company, 1982.

CRECIMIENTO FRACTAL. Leonard M. Sander en *Investigación y Ciencia*, n.º 126, págs. 66-78; marzo de 1987.

Libros

Banks, cosmología, solución de problemas y vegetación española

Luis Alonso, David Jou, Miguel de Guzmán y Alfonso Susanna

Sir Joseph Banks 1743-1820, por Harold B. Carter. British Museum (Natural History); Londres, 1988.

Se ha escrito, con la razón de las cifras, que la columna vertebral del comercio exterior español, durante los siglos XVI-XVIII, fue la exportación de lana castellana a los mercados europeos. Tras distintos avatares, de crisis y reactivación, en 1795 el sector ganaba 80 millones de reales. Ese mismo año, las dos terceras partes iban a Inglaterra. Pero en 1786 Joseph Banks había pedido ya a su viejo amigo William Eden le trajera de París el opúsculo de Daubenton *Observations sur la comparaison de la nouvelle laine superfine de France avec la belle laine d'Espagne*. En mayo de 1787 Eden estaba ya en Madrid con el encargo de hacerse con el secreto de la lana fina castellana, procurarse algunas muestras auténticas para su examen y, a ser posible, comprar algunas ovejas. Se trataba, en palabras de Banks al Rey, de acelerar un proyecto patriótico. Tan provechoso para Gran Bretaña cuan ruinoso para España. Ese capítulo de nuestra historia que omiten los manuales merece en esta obra un apartado específico.

Banks ocupa, además, un lugar señero en el campo de la ciencia. Presidente de la Regia Sociedad Londinense a los 35 años, ejerció el cargo durante 42 ininterrumpidos, que asistieron a un extraordinario desarrollo del saber de Inglaterra y Europa Occidental. Suyo fue el esplendor de los jardines reales de Kew, alentó el trabajo astronómico de William Herschel, los viajes del árbol del pan de William Bligh, la exploración de Africa, la búsqueda en el Artico del paso del noroeste, la protección de Islandia... Paradójicamente, no tenía todavía el biógrafo que enhebrara todas esas actividades con un vaciado detenido de su ingente correspondencia, apuntes, documentos oficiales, notas de viajes y demás; quizás hayan sido necesarios los 25 años que le ha dedicado Carter, coronados con este magnífico volumen de 672 páginas, de lectura fácil y escogido aparato gráfico.

Compone su historia vital, el libro, a través de tres perfiles que nos acercan a su *vero volto*: el viajero (1743-1779), el sabio (1778-1797) y el político (1797-1820). Precede al primero un repaso a los antepasados de Banks, que le da pie para recrear la escasa movilidad de una sociedad estrechamente ligada a la posesión de la tierra, o como el autor resume gráficamente: más de abuelos que de nietos. Joseph Banks, educado en los clásicos grecolatinos de acuerdo con los cánones de su rango (su padre era miembro del Parlamento), no parece haber sido un alumno modelo, salvo en su interés por la historia natural despertado tras la lectura del *Herball* de Gerard, un centón indigesto escrito en 1597, que aportaba como novedad el primer grabado de la patata. Más fruto sacaría de su familiaridad con las colecciones de Sloan y las procedentes de Africa que comenzaban a engrosar sus pliegos, de su trabajo en el British Museum y de su expedición, a bordo del *Niger*, en 1766-1767, que le inició en la biología marina. (Carter sabe entretejer los viajes largos con otros no menos útiles hacia el interior de su país que le permiten asentar sus conocimientos adquiridos en los herbarios con la distribución geográfica, rareza o predominio de las distintas especies. Y lo dicho de los vegetales ha de extenderse a la zoología, mineralogía, recursos hídricos, desarrollo de las lanzaderas y mil aspectos más que ocupaban el afán de un ilustrado georgiano.)

El viaje por excelencia fue, sin duda, el realizado con James Cook, a bordo del *Endeavour*; no dejó nada al albur, como certifica John Ellis en su misiva a Linneo: "Nadie se hizo nunca a la mar mejor preparado según las exigencias de la historia natural. Llevaba una biblioteca selecta, toda suerte de aparatos para cazar y conservar insectos, un equipo completo de redes, nasas, arrastres y garfios para la pesca del coral; llevaba incluso un microscopio adecuado para la observación en medio acuático... Había una batería de cajas repletas de botellas de distintos tamaños con alcohol para la conservación de los animales. Cargaron distintas clases de sales para salvar las semillas... y gente cuya única misión era auxiliarle en su auténtica finalidad...".

El retrato del Banks sabio tiene por fondo su labor al frente de la Regia Sociedad. Tarea que va desde urgir la publicación de los resultados de las expediciones hasta vigilar el cuidado y progreso de la niña de sus ojos: los jardines de Kew, pasando por facilitar, a través de una pensión oficial, el trabajo astronómico de William Herschel, quien el martes 13 de marzo de 1781 le había comunicado la observación de un cuerpo de magnitud desconocida y que él supuso, en una primera aproximación, que se trataría de un cometa; en posteriores observaciones lo identificó como un nuevo planeta: Urano. Pero no fueron años plácidos aquellos en los que, a la competencia científica de Francia –Cassini y Lavoissier–, se unían las disensiones partidistas en el seno de la propia institución. Ello no menoscabó la energía que puso en los proyectos que le eran más caros, relacionados con los descubrimientos marítimos y las muestras traídas, que cubrían el Pacífico, Asia y Oriente lejano, Africa y Nueva Gales del Sur; el planisferio de las páginas 286 y 287 refleja la vastedad de sus colecciones. Aunque no era la suya una postura del mero esteta, sino que se esforzó por dar a Gran Bretaña, a través de la ciencia aplicada, un impulso hasta entonces desconocido, con su apoyo a la determinación precisa de la longitud, al refinamiento de los cronómetros, a la mejora de la agricultura y la ganadería, yendo él por delante con la explotación de sus tierras en Revesby Abbey, la instalación de invernaderos o las granjas experimentales.

Este talante explica los rasgos principales que se desprenden del tercer boceto: el hombre público, que el autor polariza en las relaciones con Francia y en la exploración de su país, Australia, donde Banks llevó, para su explotación, la cabaña merina. No olvida, sin embargo, su papel en la mejora de la armada, que le daría a los ingleses la victoria de Trafalgar. Son los decenios últimos de su vida con dolorosos ataques de gota, que coinciden con la sistematización de la geología. Se cierra la obra, bibliografía e índices aparte, con 27 apéndices que recogen los principales datos de los viajes (personal embarcado, lugares visitados, equipos de a bordo, especies traídas, origen de las colecciones, inventarios, publicaciones relacionadas con la actividad de Banks, gastos y demás).

En breve: una obra modélica para

cualquier institución estatal que haya de sufragar libros de este tenor, y de las que andamos menesterosos por estos lares. Convendría en una próxima edición corregir algunas erratas. *Cabana*, en cursiva en el original, debe escribirse con la tilde de la ñ; Cervera no está en Castilla la Vieja, sino en Cataluña; evítese asimismo la manía inglesa de italianizar los nombres españoles. Pero son abrojos que no deben entorpecernos la entrada en este frondoso bosque. (L. A.)

HISTORIA DEL TIEMPO. DEL BIG BANG A LOS AGUJEROS NEGROS, por Stephen H. Hawking. Editorial Crítica; Barcelona, 1988.

La cosmología física es el campo de la ciencia que cuenta con más libros de divulgación. Sin embargo, pocos autores han podido tener el privilegio de escribir una obra sobre este tema en que su aportación científica personal pudiera desempeñar un papel destacado. Este fue el caso de G. Gamow en *La creación del universo* (1952) o el de S. Weinberg en *Los tres primeros minutos del universo* (1977). Este es también el caso de S. Hawking en su libro reciente *Historia del tiempo. Del big bang a los agujeros negros*, probablemente el mayor éxito editorial en el campo de la divulgación científica.

No insistiremos en la claridad y la concisión del libro, ya que son bastantes las obras claras y amenas que se han escrito sobre cosmología. Nos preguntaremos más bien por sus aspectos más distintivos y originales que son, a nuestro entender, la conexión entre agujeros negros y el estado inicial del universo, y el interés por las connotaciones metafísicas de los problemas físicos tratados.

La obra de Hawking –cuya evolución estructura el libro que comentamos– se ha centrado en el estudio de los agujeros negros y del origen del universo. En la visión habitual, los agujeros negros son unos objetos particulares del universo –el estado final de las estrellas cuya masa supera aproximadamente el doble de la solar. Los efectos gravitatorios son en estas estrellas tan notables que, al terminar su combustible nuclear, se colapsan hasta un solo punto de densidad infinita (singularidad). Este punto no es directamente perceptible desde el exterior, ya que queda separado del resto del universo por un horizonte de sucesos, superficie ideal de la que ningún objeto, ni siquiera la luz, puede escapar.

La conexión entre estos objetos particulares y el conjunto del universo es una simetría matemática: al colapso de los agujeros negros hasta un punto de densidad infinita corresponde la gran explosión desde un estado de densidad infinita. A través de esta simetría, y basándose en unos teoremas de Roger Penrose sobre el colapso de agujeros negros, Hawking demostró hacia finales de 1960 que, si la relatividad general es válida y si se cumplen ciertas condiciones razonables, el estado inicial del universo debió ser una singularidad.

Estas investigaciones llevaron a Hawking a interesarse en los agujeros negros, en cuyo estudio consiguió su éxito más relevante: la llamada radiación de Hawking (1974). Al combinar relatividad general con mecánica cuántica, los agujeros negros, de los que en la teoría clásica nada puede salir, pasan a emitir radiación y materia. Este resultado, uno de los más llamativos de la década de los setenta, es quizás el resultado más espectacular y concreto de la combinación entre relatividad general y mecánica cuántica, las dos grandes revoluciones físicas de la primera mitad del siglo, cuya unificación es todavía un problema pendiente.

El tercer paso de interés en el desarrollo lógico del libro consiste en aplicar una combinación de relatividad general y mecánica cuántica a la descripción del universo. En esta nueva visión, y al expresar el tiempo en unidades imaginarias, se obtiene un espacio-tiempo cerrado sobre sí mismo, en el cual inicio y final no son estados de densidad infinita, sino estados suaves sin singularidad, como los polos norte y sur de una esfera. Hasta aquí, las ideas físicas básicas del desarrollo del libro. La presentación es original y ambiciosa, aunque habrá que esperar a ver a dónde llevan los esfuerzos actuales de unificación mediante teorías de supercuerdas para saber qué proporción de sus enunciados seguirá vigente dentro de un cuarto de siglo.

La segunda faceta original de la obra es su interés explícito y destacado por las connotaciones metafísicas de los temas tratados. Este es precisamente su aspecto más discutible y polémico, aunque contribuye considerablemente al interés del libro. Una primera preocupación es epistemológica: ¿podemos conocer el estado inicial del universo? En la teoría clásica la respuesta es negativa, puesto que la singularidad está fuera del alcance de la física. En la combinación con la teoría cuántica, la respuesta parece ser, en cambio, positiva, al menos en principio, ya que la singularidad es evitada. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que la imagen de lo que ocurre varía notablemente al pasar del tiempo imaginario al tiempo real, por lo cual esta posibilidad de conocimiento es más una cuestión abierta que una respuesta definitiva.

Una segunda preocupación se refiere a Dios. Si se puede conocer el estado inicial, ¿nos puede éste decir algo sobre Dios? Si el espacio-tiempo es cerrado sobre sí mismo, ¿es necesaria una creación? Las preguntas son, desde el punto de vista filosófico, algo ingenuas. Es dudoso que un espacio-tiempo cerrado sobre sí mismo sea un problema ontológicamente menor que el de un espacio-tiempo abierto. Es dudoso que el conocimiento del estado inicial (fenómeno) nos informe sobre el ser y el sentido del universo.

La posición de Hawking con respecto a Dios es algo ambigua: Dios no es necesario como creador, pero quizá sí lo sea para explicar el porqué del universo. Conocer las leyes definitivas de la física vendría a ser para Hawking conocer el pensamiento de Dios. El libro resulta equívoco a la hora de definir límites entre el cómo y el porqué. En algunos puntos parece albergarse la ilusión de que el conocimiento del mecanismo –el cómo científico– pueda revelar su sentido –el porqué metafísico–. En otros puntos del libro, la separación entre ambos problemas se hace más grande y desolada.

El libro, en definitiva, es claro en la exposición, original en el contenido y provocador en el pensamiento, tres características que permiten diversos niveles de lectura y que harán que, cuando ya haya pasado la oleada de curiosidad popular por el científico de la silla de ruedas y el sintetizador de voz, el libro conserve no pocos atractivos. (D. J.)

PENSAR MATEMÁTICAMENTE, por John Mason, Leone Burton y Kaye Stacey. M. E. C. y Labor, S. A.; Barcelona, 1988.

Desde la aparición de los diferentes libros de G. Polya, *How to solve it, Mathematics and plausible reasoning, Mathematical discovery,* dedicados al estudio de las estrategias de pensamiento matemático en la resolución de problemas, y que constituyen sin duda los hitos que han señalado el camino de desarrollo de la heurística matemática moderna, no ha habido probablemente ningún libro en este campo con orientación eminentemente práctica que haya sido tan favorablemente acogido internacionalmente como el que vamos a comentar. Para convencerse de ello puede uno leer la recensión, acerca del original inglés, *Thinking mathematically*, escrita por A. Schoenfeld en

Zentralblatt für Didaktik der Mathematik 16 (1984), 103-105, y la recensión de la traducción al alemán con el título *Hexeneinmaleins: kreativ mathematisch denken*, realizada por B. Zimmermann, asimismo en *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik* 18 (1986), 155-159.

La realización de esta coedición en castellano por el Ministerio de Educación y Ciencia y la editorial Labor constituye un gran acierto que hubiera podido ser aún mayor si no se hubieran dejado transcurrir casi seis años desde la primera edición del original inglés.

Una de las tendencias generales de la enseñanza de la matemática más difundidas hoy consiste en el hincapié en la transmisión de los *procesos de pensamiento* matemáticos en la resolución de problemas más bien que en la mera transferencia de contenidos. La matemática es, sobre todo, *saber hacer*, es una ciencia en la que el método claramente predomina sobre el contenido. Por ello se concede gran importancia actualmente al estudio de las cuestiones, en gran parte lindantes con la psicología cognitiva, que se refieren a los procesos mentales de resolución de problemas. En nuestro mundo científico e intelectual tan rápidamente mutante, vale mucho más hacer acopio de procesos mentales útiles que de contenidos que fácil y velozmente se vuelven obsoletos. En esta dirección se encauzan los esfueros por transmitir estrategias heurísticas y estilos de pensamiento adecuados para la resolución de problemas en general, por estimular la resolución autónoma de verdaderos problemas, más bien que la mera transmisión de recetas adecuadas a cada materia.

La obra de Mason, Burton y Stacey constituye una magnífica introducción práctica a los procesos de pensamiento valiosos en el enfrentamiento con problemas matemáticos. Posee unas cuantas características que, a mi parecer, la colocan a gran altura sobre otras obras actuales de sabor parecido. La más importante consiste en la intensa dedicación a lo largo de toda la obra, pero especialmente en el capítulo 7, *Desarrollar un monitor interior*, a los aspectos psicológicos y emocionales que sin duda desempeñan un papel muy importante en el proceso humano de resolución de problemas. Se puede decir que este aspecto casi se había soslayado hasta ahora en las obras de este género. Los autores han logrado incorporar con éxito, dentro de un esquema de fácil aplicación, muchas de las ideas importantes y valiosas elaboradas por los expertos en teoría de la resolución de problemas tales como A. Schoenfeld.

Los autores logran la creación de un clima de confianza a través del convencimiento del gran valor emocional de los pequeños avances que uno mismo pueda realizar para la mejor comprensión de la situación del problema, incluso a través del aprovechamiento consciente de los estados de bloqueo mental, confusión, sensación de atasco, a la que con frecuencia uno llega en el intento de enfrentarse con un verdadero problema, matemático o no. Las nuevas estrategias prácticas que proponen, tales como el autoexamen consciente del propio proceso mental, la plasmación en "rótulos" de los estadios del proceso, la utilización del "enemigo interior" que nos ayude a aceptar con realismo la fragilidad de nuestros argumentos, el desarrollo de un "monitor interior" que vaya controlando positivamente nuestros procesos mentales, constituyen novedades muy interesantes y efectivas en el intento de mejorar nuestra capacidad de resolución de problemas.

Basta observar la estructura de la obra a través de su índice analítico y de su índice de materias para percibir este interés de los autores por presentar, *más que un conjunto de estrategias de pensamiento, todo un estilo de actitudes mentales* mucho más profundas, que abarcan no sólo el esqueleto lógico de los procesos de pensamiento sino también aspectos más hondos que atañen a la estructura emocional de la persona y la estrategia aconsejable en cada momento del proceso de resolución.

La obra presenta una magnífica colección de más de 100 problemas, muy originales y bien escogidos. Esta antología, en sí misma, ya superaría en valor heurístico muchas de las obras actuales que casi solamente vienen a ofrecer eso, un mero listado de problemas. Pero *Pensar matemáticamente* aporta mucho más. Los problemas, de los cuales se presenta la solución completa en unos pocos casos, como para resaltar que lo importante no es dar con la solución sino el propio ejercicio de la mente, van engarzados en el hilo conductor de la obra hacia la adquisición de las actitudes mentales adecuadas de tal modo que su tratamiento resulta muy estimulante e ilustrativo.

Son verdaderos problemas los que aquí se presentan, no meros ejercicios rutinarios para remachar unos contenidos previamente impartidos. El gran mérito de esta selección consiste en que todos ellos pueden ser abordados sin necesidad de disponer de conocimiento alguno de contenidos matemáticos que vayan más allá de los impartidos en la educación básica. Esto hace la obra perfectamente utilizable a todos los niveles imaginables de experiencia matemática. Tal vez el título, tanto en el original inglés, *Thinking mathematically*, como en la versión castellana, *Pensar matemáticamente*, pueda espantar a más de un aborrecedor de las matemáticas. No son matemáticas lo que aquí va a encontrar, sino *métodos y ejercicios para mejorar los propios procesos de pensamiento*, lo cual, evidentemente, es tan útil para el amante de las matemáticas como para el que las aborrece cordialmente. Tal vez el título de la versión alemana, *Hexeneinmaleins*, con su carácter festivo poniendo a las brujas por medio, ha querido hacerse eco de este aspecto de puzzle divertido de la gran mayoría de los problemas que aquí se presentan.

La traducción, realizada por Mariano Martínez, es excelente, lo cual es altamente meritorio, teniendo en cuenta el lenguaje coloquial y abreviado utilizado a menudo en el original inglés. La presentación material es muy cuidada. En conjunto, resulta una obra magnífica que puede contribuir a mejorar substancialmente el estilo de pensamiento de cualquiera que la trabaje a fondo y que constituirá, sin duda, un instrumento eficaz para nuestra enseñanza matemática. (M. G.)

MEMORIA DEL MAPA DE SERIES DE VEGETACIÓN DE ESPAÑA, por S. Rivas Martínez y col. Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; Madrid, sin fecha (¿1988?).

La Península Ibérica es una zona de contacto entre dos regiones muy diferentes en todos los aspectos: la región eurosiberiana y la región mediterránea; además, posee una diversidad climática, geológica y topográfica de sobra conocida. No hace falta poner ejemplos; basta comparar por un momento en nuestra imaginación el valle del Saja en Santander con la Hoya de Baza en Granada. La vegetación, en semejantes condiciones, es de una complejidad y variedad enormes. Ha habido muy pocos intentos de describir y racionalizar este abanico de una forma global. En tiempos modernos, prácticamente ninguno. Por eso es de agradecer que Rivas Martínez se haya lanzado por fin a esta tarea: es la persona más indicada para llevarla a cabo.

Antes de explicar lo que es esta recién publicada memoria, hay que hacer una importante aclaración a los posibles lectores: no se trata de un libro en el sentido tradicional, y menos aún de una obra divulgativa. Se trata de una memoria explicativa del mapa de las series de vegetación de España publicado por el ICONA y es una obra claramente técnica y no poco árida, destinada únicamente a especialistas. Nadie se llame a engaño ni espere encontrar concesiones al profano en las materias que trata la obra: no hay ninguna.

Tras una breve introducción, entramos a repasar la biogeografía de España. Se debaten los diversos modelos biogeográficos publicados sobre Europa, llegando a la conclusión –acertada según mi experiencia– de que los esquemas de división propuestos por los autores centroeuropeos (Meusel y col., especialmente) adolecen del mismo defecto: no resuelven con precisión las dificultades que plantea el mundo mediterráneo; lógico, por otra parte, pues la Europa no mediterránea no presenta ningún problema biogeográfico gracias a su homogeneidad. A continuación se expone la caracterización de la biogeografía española. Este es uno de los puntos más sólidos de la obra, pues es el fruto y el reflejo de muchos años de estudio y del conocimiento profundísimo de la geografía vegetal española que posee el autor. Queda algún que otro punto que no es de recibo en la nomenclatura de las regiones; por ejemplo, el voquible "extremadurense" (me permito preguntar cómo suena el nombre "sector corológico Cataluñense"; supongo que como lo que es: un inaceptable exceso verbal). Pero estos fallos son muy escasos y se deben considerar *peccata minuta*.

A continuación nos encontramos con un completísimo y exhaustivo estudio sobre la bioclimatología española; es, de lejos, el más completo que he visto, pues recoge los datos esenciales de todas las estaciones meteorológicas de España y presenta diagramas de las más representativas de los distintos tipos bioclimáticos.

Concluida la caracterización biogeográfica y bioclimática de España, entramos en el cuerpo central de la memoria: el detalle de las series de vegetación. Hay algunos puntos en este trabajo que serán muy criticados: la metodología es el más evidente. La fitosociología, o sociología vegetal, es una ciencia que parece predestinada a generar grandes amores y grandes odios; algo inherente a una ciencia que tiene mucho de arte y lleva consigo una cierta carga de subjetividad. Las dificultades –y las críticas– crecen exponencialmente cuando se trata de integrar las diversas comunidades en series y sucesiones (es decir, cuando se pretende explicar cómo evoluciona la vegetación) en la llamada sinfitosociología. Si

añadimos ahora los datos geológicos y edafológicos, llegamos a un problema de tal complejidad que sólo puede abarcarlo una cabeza realmente excepcional, pertrechada además de un conocimiento incomparable del terreno. Ese es el mayor de los defectos de esa ciencia-compendio que es la geosinfitosociología, base del método de Rivas Martínez: que queda muy lejos del alcance del común de los mortales. Pero, a pesar de todas las discusiones y de todos los denuestos, el método fitosociológico sigue siendo el único que hay. Mientras no se invente otra forma de encarar los estudios de vegetación, habremos de recurrir a él. Las querellas metodológicas entre escuelas, por supuesto, no vienen al caso.

En este capítulo es donde con más claridad se aprecia el exhaustivo conocimiento de la vegetación. Lástima que el método empleado, con su terminología enrevesada, lo haga de lectura casi imposible. Pero no debemos dejar de lado la idea principal que mencionaba al principio: esta memoria no es un libro de divulgación ni lo pretende. De todas maneras, a pesar de las dificultades de comprensión para un lector no familiarizado con la fitosociología, puede entresacarse mucha información accesible y de gran valor. Cualquier persona con un conocimiento mediano del paisaje español y rudimentos de botánica puede disfrutar mucho leyendo estas páginas, si tiene la paciencia suficiente para desbrozarlas de su tecnicismo.

El autor incluye a continuación un capítulo de nomenclatura fitosociológica de interés exclusivo de los estudiosos de esa ciencia y oportunidad dudosa en una obra de este tipo. Sigue un breve pero suficiente glosario y la leyenda del mapa de las series de vegetación a escala 1:400.000 que publicó ICONA; terminan este apartado los índices florístico –de especies citadas– y fitosociológico, seguidos de la bibliografía.

Me gustaría hacer una pequeña crítica a esta última: echo en falta la obra pionera de Mauritius Willkomm sobre la vegetación de la Península (*Grundzüge der Pflanzenverbreitung auf der iberischen Halbinsel*), publicada en la gran obra de Engler sobre la vegetación del mundo. Por supuesto, uno es libre de considerar esta obra incorrecta, pobre y por supuesto obsoleta; pero durante muchos, muchísimos años, fue la única; y siempre tendrá en su haber el mérito indiscutible de haber sido la primera. También puede hablarse de agravio comparativo porque se citan obras –y bien citadas están, por lo que a mí respecta; quede claro– que sin ninguna duda son mucho más pobres y obsoletas que la del alemán... a pesar de ser mucho más modernas.

La obra se prolonga a partir de este punto en una serie de apéndices que no añaden a mi juicio nada de interés y cuya presencia no está debidamente justificada: un mapa (que no aparece por ninguna parte; será más bien la leyenda del mapa, supongo) de productividad potencial forestal que parece más bien un resumen metodológico y una declaración de intenciones que un trabajo completo; le sigue un anexo sobre "subregiones fitoclimáticas" y un anexo final sobre "diagramas bioclimáticos". En conjunto, estas adiciones resultan de interés muy parcial y de poca relevancia comparadas con el conjunto de la memoria.

Termino con otra crítica; ésta será, necesariamente, algo más dura. La calidad de edición de esta memoria no alcanza ni de lejos la calidad científica. En general, la edición es pobre, cuando no claramente incorrecta: por ejemplo, falta nada menos que el año de edición, cosa imperdonable en una obra de esta envergadura que contiene, además, algunas propuestas sobre nomenclatura de asociaciones vegetales que necesitan ineludiblemente ser fechadas. También me pregunto qué querrán decir esas siglas "I.C.O.N.A."; mientras no añadan más palabras al nombre "Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza" se deberá escribir "ICONA". Hay que resaltar también en el capítulo negativo la mala reproducción de los dibujos de línea, que hace pasar inadvertidos los excelentes originales de algunos dibujantes de categoría, como Tomás Emilio Díaz o Pepe Pizarro. La propia proliferación al final de anexos o adiciones, de presencia a mi modo de ver no justificada si no es por razones políticas que se me escapan, puede incluirse entre los defectos editoriales.

En resumen: con sus defectos –pequeños en conjunto– se trata de una obra excepcional, que será sin duda un punto de referencia forzoso en todos los estudios sobre la vegetación de la Península. Tiene, sin embargo, un fallo; el único importante de verdad: es casi inaccesible al no iniciado en los secretos de la Sociología Vegetal. Haremos una pregunta a Rivas Martínez: ¿cuándo nos ofrecerá esa gran obra divulgativa que llevamos tanto tiempo esperando de él? Ya no hay excusa: acaba de demostrar, con esta memoria, que científicamente ya está hecha. Ya sólo falta ponerla al alcance del lego o del profano. (A. S.)

Apuntes

El descubrimiento del gen que determina los caracteres sexuales primarios del macho en los mamíferos sintetiza el proceso habitual del quehacer científico: un rápido progreso en un principio y un período de estancamiento hasta que se resuelven las aporías. En diciembre de 1987 se identificaba, en el cromosoma *Y* humano, el factor que determinaba la formación de los testículos y era responsable del desarrollo de los caracteres masculinos. Se generalizó la situación a todos los mamíferos. Pero, un año más tarde, se corregía, al menos parcialmente, la tesis: el gen en cuestión, en los marsupiales, no se halla en un cromosoma sexual, sino en un autosoma. La aporía resultante, en la que nos encontramos, es la siguiente: o las vías genéticas de determinación del sexo son distintas en el marsupial y en el hombre o bien el gen implicado no es el determinante del sexo en los humanos.

Cuanto sabemos de las civilizaciones precolombinas del hemisferio meridional débese a excavación arqueológica. La geología puede ayudar a ensanchar nuestros conocimientos. En Quelccaya, Perú, se han extraído dos núcleos de hielo que encierran concentraciones de partículas que nos hablan de la agricultura preinca practicada en torno al 600 y 920 de nuestra era.

Precolombina también parece ser la artritis reumatoide. Descubierta en Europa en 1800, aunque sus orígenes históricos y etiología sigan rodeados de bastante obscuridad, se trata de una enfermedad que el comercio trajo del Nuevo al Viejo Mundo. En Alabama se han desenterrado restos esqueléticos con esa enfermedad degenerativa de hace de 3000 a 5000 años.

Los meteoritos fósiles, aunque conservan su composición estructural, cambian sus propiedades en procesos de diagénesis que los incorporan en los sedimentos, salvo en lo concerniente a la cromita mineral. Rastreando ésta se ha hallado un nuevo meteorito pétreo fósil en Osterplana, Suecia. Tras el éxito, se confía en ese nuevo método para una búsqueda más fundamentada y sistemática de nuevos meteoritos.

Las universidades alemanas discuten todavía la viabilidad ética de la investigación en embriones, lo que ha frenado cualquier disposición parlamentaria en ese sentido. Tampoco se ha decidido todavía la Cámara de los Comunes, a la espera del proyecto del gobierno, en fase todavía de borrador y en el que se propone una doble alternativa: la prohibición absoluta o la investigación limitada a los 14 días primeros del feto humano. En España, sin debate universitario, acaba de aprobarse la ley por el partido gobernante.

Sabido es que los tejidos deben recibir una continua aportación de oxígeno para mantener la homeostasis celular. Cualquier merma de flujo sanguíneo, por pequeña que sea, puede poner en un aprieto la función fisiológica. Los métodos utilizados hasta ahora para medir la concentración de oxígeno no gozaban de exactitud y fiabilidad suficiente. Ese problema podría paliarse con el que se acaba de proponer: la formación de imágenes de fosforescencia. Por ser el oxígeno un agente poderoso contra el fósforo, la transición de un órgano bien oxigenado a otro anóxico aumenta la fosforescencia de este último.

Los átomos, cuyos electrones describen innumerables órbitas fijas, se caracterizan por su estabilidad, muy bien explicada en el marco de la mecánica cuántica. Pero las nuevas condiciones que ha posibilitado la innovación en los laboratorios de física los exponen a campos externos de extraordinaria intensidad: las órbitas se tornan entonces caóticas y vagan sin rumbo. Oriol Bohigas, un español en el Instituto de Física Nuclear de Orsay, ha logrado, asociándolas a un mar de fondo de líneas espectrales, someterlas a análisis estadístico.

Y de los electrones al núcleo. El estado de la materia ordinaria depende de su densidad y de su contenido energético; lo mismo cabe decir del estado de la materia nuclear. Ahora bien, los experimentos para determinar la ecuación de estado de alta densidad, que involucra la fuerzas que enlazan la materia nuclear, son punto menos que imposible de realizar, y sigue, por ende, abierta la cuestión de si esa materia es dura o blanda. Midiendo los períodos de los dos púlsares más rápidos conocidos, el PSR1937+214 y el PSR1957+20, y suponiendo que giran a un frecuencia de un estrella de neutrones estable, sus masas son altísimas y, en consecuencia, la ecuación de estado de la materia nuclear será durísima.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



RECIRCULACION MAGNETICA DE SOLIDOS, por Eladio Jaraíz
Muchos procesos industriales necesitan la circulación de partículas sólidas en circuito cerrado. En el laboratorio del autor se ha conseguido el control de ese movimiento por campos magnéticos.

ASI TRABAJAN LOS ACTIVADORES GENICOS, por Mark Ptashne
Hemos avanzado bastante en la activación e inhibición de las células bacterianas. El camino parece expedito para generalizar ese conocimiento a los organismos superiores.

TERREMOTOS PROFUNDOS, por Cliff Frohlich
Han constituido un fructífero enigma desde que se descubrieron hace 60 años. ¿Cómo pueden romperse las rocas a las temperaturas y presiones reinantes a centenares de kilómetros de profundidad?

LA MEZCLA DE FLUIDOS, por Julio M. Ottino
Los fluidos viscosos que cursan según esquemas sencillos y periódicos en dos dimensiones pueden generar el caos que conduce a una mezcla eficiente. Los experimentos y los modelos computacionales revelan el mecanismo subyacente.

ANDRE-MARIE AMPERE, por L. Pearce Williams
Ampère fue el primer investigador que cuantificó los efectos magnéticos de la corriente eléctrica, pero también fue un pionero de la filosofía de la ciencia. Sus concepciones filosóficas configuraron su método de descubrimiento científico.

CARBOHIDRATOS Y DEPRESION, por Richard J. Wurtman y Judith J. Wurtman
Distintos trastornos de comportamiento reconocidos a lo largo de los últimos diez años se caracterizan por cambios bruscos en el apetito y en el humor.

LA CAZA DEL *PROCONSUL*, por Alan Walker y Mark Teaford
Sesenta años después de su descubrimiento, sabemos ya que Proconsul *constituyó el último antepasado que compartió el ser humano con los grandes antropoides.*

EL PROBLEMA DE LA RED MAS CORTA, por Marshall W. Bern y Ronald L. Graham
¿Cuál es la red más corta de segmentos lineales que nos pusiera en conexión 100 puntos arbitrariamente distribuidos? La solución del problema pone en difícil aprieto a computadores velocísimos y mentes matemáticas privilegiadas.

